

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

**Kacimi Zakaria**

**&**

**Kobbi Salaheddine**

pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique spécialité Machines électriques

---

Thème

---

### **Diagnostic de la Machine**

### **Asynchrone en Présence de Défaut Statorique par la technique des ondelettes**

---

Proposé par:

Promoteur : Mr. Kouchih Djilali

Co-promoteur : Mr .Hachlef Redouane

Année Universitaire 2015-2016

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chères parents, pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.*

- ❖ *A mes très chers frères.*
- ❖ *A mes sœurs.*
- ❖ *A mes tantes et mes oncles.*
- ❖ *A toute la famille **koobi** de près ou de loin sans exception.*
- ❖ *A mes chers amis de mon quartier.*
- ❖ *A tous mes amis de près ou de loin sans exception.*
- ❖ *A mes chers amis de l'université.*
- ❖ *A mon promoteur **Mr. kouchih** et Co-promoteur **Mr.HACHELAF** et mon binôme *zkarai kacimi**

**SALAHEDDINE KOBBI**

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes chères parents, pour leurs soutient moral et financier  
et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé  
pour terminer mes études dans des bonnes conditions, en leurs  
espérant une longue vie et que الله les gardes.*

- ❖ *A mon cher frère.*
- ❖ *A mes sœurs.*
- ❖ *A mes tantes et mes oncles.*
- ❖ *A mes chers amis de mon quartier.*
- ❖ *A mes chers amis de l'université.*

*A mon promoteur Dr. Kouchih et com-promoteur Mr.HACHELAF et  
mon binôm KOBBI SALAHEDDINE*

**\*KACIMI ZAKARIA\***

# Remerciements

*Au terme de ce travail, nous tenons a remercié en premier lieu **الله** Miséricordieux de nous avoir donné la santé et le courage afin d'accomplir ce modeste travail et de nous avoir permis d'atteindre la fin de notre formation.*

*Nos remerciements et notre reconnaissance vont à notre promoteur **Mr. Kouchih.D** et Co-promoteur **Mr.hachlef.R** qui a accepté de nous encadrer et qui nous a guidés pendant l'élaboration de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses conseils précieux,*

*Nous adressons nos sincères salutations et nos vifs remerciements à tous ceux qui nous encouragés et donnés les mains d'aides, de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail afin qu'il soit présentable.*

*Nos vifs remerciements vont à Monsieur le Président de jury, pour l'honneur qu'il nous fait et aux membres du jury pour avoir accepté de corriger et d'évaluer ce travail.*

*Enfin nous exprimons notre reconnaissance à tous les Enseignants du département d'Electronique qui ont contribués à notre formation*

*Universitaire de BLIDA.*



## ملخص

في هذه المذكرة إستعملنا تقنية الموجات بهدف تشخيص أعطاب الآلة اللامتزامنة ذات القفص السنجابي . هذه التقنية التي تعرض تحليلا دقيقا للإشارات الأحادية و الثنائية البعد عن طريق تقسيم إلى موجات متقطعة او إلى حزمة موجات، أستعملت لإنتزاع المعلومات الضرورية من تيار المحرك لآلة .التطبيقات المختلفة للتحويل المتقطع إلى موجات في مجال تشخيص الأعطاب أختبرت على إشارات حقيقية مرفوعة من آلات بها خلل .تقسيم التيار الساكن أنجز بمساعدة علبة الادوات « WAVELT TOOLBOX » .

و النتائج المحصل عليها برهنت فعالية التقنية في إكتشاف الأعطاب في الجزء الساكن والمتحرك واللاسكونية في حين هذه الخاصية ليست متوفرة في التحليل FFT .

**الكلمات المفتاحية :** أعطاب الآلة اللامتزامنة ، وضع نموذج للآلة اللامتزامنة ذات القفص السنجابي ،تقنية الموجات.

## Abstract

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

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

## Résumé

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

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

# SOMMAIRE

---

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES FIGURES

Introduction générale

## CHAPITRE 1 :Présentation de la machine asynchrone et ces défauts

1.1 Introduction .....	3
1.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone .....	3
1.2.1 Stator.....	4
1.2.2 Rotor.....	5
1.2.3 Paliers .....	7
1-3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone .....	7
1-4 Glissement.....	8
1.5 Défaillances de la machine asynchrone .....	8
1.5.1 Défaillances d'ordre mécanique .....	11
1.5.1 .1 Défaillances des roulement.....	11
1.5.1 .2 Défaillances des flasques.....	12
1.5.1 .3 Défaillances de l'arbre .....	13
1.5.1 .4 Défauts d'excentricité .....	13
1.5.2 Défaillances d'ordre électriques .....	15
1.5.2.1 Défaut de court-circuit .....	15
a. Court-circuit entre spires.....	15
b. Court-circuit entre phases .....	15
c. Court-circuit phase/bâti .....	16
d. Défauts de circuit magnétique.....	17
e. Défaillances des circuits électriques rotoriques .....	17

# SOMMAIRE

---

1-6. Les fonctions de la surveillance .....	18
1.7 Méthodes de diagnostic.....	20
1.7.1 Méthodes externes .....	20
1.7.2 Méthodes internes.....	20
1.7.3 Méthodes inductives.....	21
1.7.4 Méthodes déductives .....	21
1-8. Détection des défauts par traitement du signal.....	21
1-8.1 Transformé de Fourier rapide (FFT).....	22
1-8.2 Technique d'ondelettes .....	22
1.9 Conclusion .....	22

## CHAPITRE 2 Modélisation de la machine asynchrone

2-1 Introduction.....	23
2-2 Modèle d'une machine asynchrone triphasée sain .....	24
2-2-1 Equations des tensions .....	25
a -Stator.....	25
b-rotor.....	25
2-2-2 Equations de flux .....	25
2-2-3 Equations mécanique et du couple électromagnétique .....	26
2-3 Modèle de la machine asynchrone triphasée à cage :( avec défaut).....	29
2-3-1 Les défauts statorique .....	29
2-4 Resultat Simulation avec l'alimentation directe par réseau triphasé .....	31
A-Présentation des résultats dans le régime normale (moteur sain).....	31
B-Présentation des résultats dans le régime normale (court-circuit statorique) .....	36
2-5 Conclusion.....	46

## Chapitre 3 Technique des ondelettes

# SOMMAIRE

---

3.1 Introduction .....	47
3.2 De l'analyse de Fourier à l'analyse par ondelettes .....	47
3.2.1 Exemple d'application de la transformée de Fourier FT .....	48
a- Signal stationnaire.....	48
b- Signal non stationnaire.....	49
3.2.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante STFT.....	50
3.2.2.1 Exemple d'application de la transformée de Fourier à fenêtre glissante STFT.....	51
3.2.2.2 Limitations de la TF à fenêtre glissante.....	53
3.3 Transformée en ondelettes .....	54
3.3.1 Définition .....	54
3.3.2 Transformée en ondelettes continue (TOC).....	57
3.3.3 Application de la transformée d'ondelette continue.....	59
3.3.4 Transformée en ondelettes discrète (TOD) .....	60
3.3.4.1 Décomposition simple.....	62
3.3.4.2 Décomposition multi niveaux.....	62
3.3.4.3 Reconstruction par ondelette.....	63
3.3.4.4 Décomposition et Reconstruction multi-niveau par ondelettes.....	64
3.3.4.5 Application de la TOD.....	65
a-Décomposition simple.....	65
b-Décompositions multi –niveaux.....	65
3.3.5 Décomposition par paquets d'ondelettes.....	66
3.3.6 Classification des types d'ondelettes.....	68
3.3.7 Critère du choix de l'ondelette mère et l'ordre de décomposition.....	69
a-choix de la fréquence d'échantillonnage.....	69
b-choix du nombre de niveau de décomposition .....	69
c-Choix du type de de l'ondelette mère.....	70
3-4 CONCLUSION.....	70

## Chapitre 4 Application de la technique des ondelettes au diagnostic

4.1 Introduction.....	71
4.2 Résultats de simulation en présence de défaut court-circuit entre spire.....	71
4.2.2 Application de la transformée de Fourier.....	72

# SOMMAIRE

---

4.2.2 Application des techniques ondelettes.....	77
4.2.3 Application de la TOC.....	77
a-L'état sain.....	77
b- Défaut de court-circuit dans une seule phase statorique.....	77
c-Variation de Défaut de court-circuit dans une seule phase statorique.....	81
4.2.4 Application de la transformée d'ondelettes discrète.....	83
4-3 Conclusion.....	87

Conclusion generale

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

# Liste des symboles

---

## LISTE DES SYMBOLES

$\Omega_s$  : La vitesse de synchronisme (rad/sec)

$\Omega$  : La vitesse mécanique de rotor (rad/sec)

P : nombre paire des pôles

$\Omega_g$  : vitesse de glissement

$n_s$  : La vitesse de synchronisme (tr/min)

n : La vitesse mécanique de rotor (tr/min)

$f_s$ : La fréquence d'alimentation

f : La fréquence de défaut

$f_{cc}$  : la fréquence de court-circuit

g : Le glissement

B : l'induction magnétique

$\mu_0$  : perméabilité magnétique du vide (de l'air).

F : La force radiale

Fm: La force magnétomotrice de la phase "A".

p : Permeance de l'entrefer.

$V_A, V_B, V_C$  : Les tensions statorique

$V_a, V_b, V_c$  : Les tensions rotorique

$\Phi_A, \Phi_B, \Phi_C, \Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  Les flux totaux à travers les enroulements statoriques et rotoriques.

$J_t$ : Représente l'inertie totale ramenée à l'arbre moteur

[I]:  $[i_A i_B i_C i_a i_b i_c]^T$  Le vecteur courant

## Liste des symboles

---

$f_v$ : Le couple de frottement visqueux

$C_e$ : Le couple électromagnétique

$C_r$ : Le couple résistant appliqué à la machine.

$\theta$  : La position du rotor par rapport au stator.

$R_S$  : Résistances des bobinages du stator

$R_R$  : Résistances des bobinages du rotor

$M_{sr}$  : L'inductance mutuelle entre le stator et le rotor

$M_{rs}$  : L'inductance mutuelle entre le rotor et le stator

$L_{sc}$  : L'inductance cyclique du stator

$L_{rc}$  : L'inductance cyclique du rotor

$[U]$  : Le vecteur de commande

$[X]$  : Le vecteur d'état

$[L]$  : La matrice inductance

$f_{sa,b,c}$  : pourcentages de réduction du nombre de spires aux trois phases a, b et c du stator .

$[L_{SS}]$  : Matrice spécifique au stator comprenant,

$L_s$  : Inductance propre d'un enroulement statorique,

$M_S$  : Inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques.

$[L_{RR}]$  : Matrice spécifique au rotor comprenant,

$L_r$  : Inductance propre d'un enroulement rotorique,

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux enroulements rotoriques.

$\sigma_t$  : La résolution temporelle

## Liste des symboles

---

$\sigma_v$  : La résolution fréquentielle

S : Echelle

u : Translation

$\psi_{u,s}(t)$  : Ondelette mère

C(u, s) : Coefficients d'ondelettes

h(j) : Filtre passe bas

g(j) : Filtres passe haut

$N_{LS}$  : Niveau de décomposition nécessaire

j: Niveau de décomposition

fs : Fréquence d'alimentation

fe : Fréquence d'échantillonnage



# LISTE DES FIGURES

---

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1.</b> Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil.....	4
<b>Figure 1.2.</b> Stator .....	5
<b>Figure 1.3.</b> Rotor à cage d'écureuil .....	6
<b>Figure 1.4.</b> PALIERS.....	7
<b>Figure 1.5.</b> Sources des défauts de la machine asynchrone à cage .....	9
<b>Figure 1.6 :</b> Causes du défaut externe de la machine triphasée.....	10
<b>Figure 1.7 :</b> roulement à bille .....	11
<b>Figure 1.8</b> Dimensions d'un roulement à billes .....	12
<b>Figure 1.9</b> Différents types de la dissymétrie de l'entrefer .....	14
<b>Figure 1.10</b> Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte.....	14
<b>Figure 1.11:</b> Représentation schématique de court-circuit statorique .....	16
<b>Figure 1.12</b> Les différent étape de diagnostic.....	19

## Chapitre 2

<b>Figure. 2.1</b> Modèle généralisée de la MAS triphasé.....	24
<b>Figure. 2.2</b> La tension de réseau.....	31
<b>Figure. 2.3.</b> Courant de la phase A de la MAS sain à vide .....	32
<b>Figure. 2.4.</b> Courant de la phase B de la MAS sain à vide .....	32
<b>Figure. 2.5.</b> Courant de la phase C de la MAS sain à vide .....	32
<b>Figure. 2.6</b> Courants statoriques de la MAS sain sain à vide .....	32
<b>Figure. 2.7.</b> le courant rotorique de la MAS sain à vide .....	33
<b>Figure. 2.8.</b> Le couple électromagnétique de la MAS sain à vide.....	33
<b>Figure. 2.9.</b> la vitesse mécanique de la MAS sain à vide.....	33
<b>Figure. 2.10</b> .Courant de la phase A de la MAS sain on charge.....	34
<b>Figure. 2.11</b> .Courant de la phase B de la MAS sain on charge.....	34

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure. 2.12</b> .Courant de la phase C de la MAS sain on charge.....	35
<b>Figure. 2.13</b> Courants statoriques de la MAS sain on charge. ....	35
<b>Figure. 2.14</b> .Courant rotorique de la MAS sain on charge.....	35
<b>Figure. 2.15</b> . Le couple électromagnétique de la MAS sain on charge .....	35
<b>Figure. 2.16</b> . la vitesse mécanique de la MAS sain on charge.....	36
<b>Figure. 2.17</b> Courant de la phase A de la MAS court-circuit à vide.....	37
<b>Figure. 2.18</b> Courant de la phase B de la MAS court-circuit à vide.....	37
<b>Figure.2.19</b> Courant de la phase C de la MAS court-circuit à vide.....	37
<b>Figure. 2.20</b> Courants statoriques de la MAS court-circuit à vide.....	37
<b>Figure. 2.21</b> Courant rotorique de la MAS court-circuit à vide.....	38
<b>Figure. 2.22</b> Le couple électromagnétique de la MAS court-circuit à vide.....	38
<b>Figure.2.23</b> la vitesse mécanique de la MAS court-circuit à vide.....	38
<b>Figure.2.24</b> Courant de la phase A de la MAS court-circuit à vide.....	39
<b>Figure. 2.25</b> Courant de la phase B de la MAS court-circuit à vide.....	39
<b>Figure. 2.26</b> Courant de la phase C MAS court-circuit à vide.....	39
<b>Figure. 2.27</b> Courants statoriques de la MAS court-circuit à vide.....	39
<b>Figure. 2.28</b> Courant rotorique de la MAS court-circuit à vide.....	40
<b>Figure. 2.29</b> Le couple électromagnétique de la MAS court-circuit à vide.....	40
<b>Figure. 2.30</b> la vitesse mécanique de la MAS court-circuit à vide.....	40
<b>Figure. 2.31</b> Courant de la phase A de la MAS court-circuit on charge .....	41
<b>Figure. 2.32</b> Courant de la phase B de la MAS court-circuit on charge .....	41
<b>Figure. 2.33</b> Courant de la phase C de la MAS court-circuit on charge .....	42
<b>Figure. 2.34</b> Courants statoriques de la MAS court-circuit on charge .....	42
<b>Figure. 2.35</b> Courant rotorique de la MAS court-circuit on charge .....	42
<b>Figure. 2.36</b> Le couple électromagnétique de la MAS court-circuit on charge.....	42
<b>Figure. 2.37</b> la vitesse mécanique de la MAS court-circuit on charge .....	43
<b>Figure. 2.38</b> Courant de la phase A de la MAS court-circuit on charge .....	43

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure. 2.39</b> Courant de la phase B de la MAS court-circuit on charge .....	43
<b>Figure. 2.40</b> Courant de la phase C de la MAS court-circuit on charge .....	44
<b>Figure. 2.41</b> Courants statoriques de la MAS court-circuit on charge .....	44
<b>Figure. 2.42</b> Courant rotorique de la MAS court-circuit on charge .....	44
<b>Figure. 2.43</b> Le couple électromagnétique de la MAS court-circuit on charge.....	44
<b>Figure. 2.44</b> La vitesse mécanique de la MAS court-circuit on charge .....	45

### Chapitre 3

<b>Figure 3.1</b> Représentation temporelle vers présentation fréquentielle.....	48
<b>Figure3.2.</b> Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoïdes.....	49
<b>Figure. 3.3</b> Représentation temporelle et fréquentielle ‘succession de deux sinusoïdes.....	49
<b>Figure 3.4</b> Représentation temporelle vers STFT.....	50
<b>Figure3.5</b> Algorithme de STFT.....	51
<b>Figure 3.6</b> Représentation temporelle et leur STFT avec taille de fenêtre (a) 0.05 et (b) 0.005.....	52
<b>Figure 3.7</b> Exemple explicatif du principe d’Heisenberg.....	53
<b>Figure 3.8</b> Représentation temporelle vers ondelettes.....	54
<b>Figure 3.9</b> : Evolution de la forme d’une ondelette et de sa transformée De Fourier (à droite).....	55
<b>Figure3.10</b> : Boîtes Temps- fréquence des deux ondelettes.....	57
<b>Figure 3.11</b> Quelques formes des ondelettes usuelles.....	58
<b>Figure 3.12</b> Signal bruit et sa transformée d’ondelettes continue.....	59
<b>Figure3.13</b> Décomposition du signal $s(n)$ , en approximations et détails.....	61
<b>Figure 3.14</b> Décomposition simple du signal $s$ en approximations et détails.....	62

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure 3.15</b> Décomposition du signal $S(n)$ en multi-niveaux selon Mallat.....	63
<b>Figure 3.16</b> Reconstruction simple d'un signal.....	64
<b>Figure 3.17</b> Algorithme de MALLAT multi niveau.....	64
<b>Figure 3.18</b> Décomposition simple représentant $A_1$ et $D_1$ .....	65
<b>Figure 3.19</b> Décomposition en 3 niveaux représentant $A_3$ , $D_1$ , $D_2$ et $D_3$ .....	65
<b>Figure 3.20</b> Représentation du signal original et leur approximation $A_3$ .....	66
<b>Figure 3.21</b> Décomposition du signal $S(n)$ en paquet d'ondelettes d'ordre 3.....	67
<b>Figure 3.22</b> Répartition des nœuds dans un arbre de décomposition par paquet d'ondelettes..	68
<b>Figure 3.23</b> calcification des types des ondelettes.....	68

### Chapitre 4

<b>Figure 4.1.a</b> Spectre du courant statorique dans l'état sain $\mu=0$ .....	72
<b>Figure 4.1.b</b> Spectre de la vitesse mécanique dans l'état sain $\mu=0\%$ .....	73
<b>Figure 4.1.c</b> Specter du couple électromécanique mécanique dans l'état sain $\mu=0\%$ .....	73
<b>Figure 4.2.a</b> Spectre du courant statorique dans l'état défaillant $\mu=5\%$ .....	74
<b>Figure 4.2.b</b> Specter de la vitesse mécanique dans l'état défaillant $\mu=5\%$ .....	74
<b>Figure 4.2.c</b> Spectre du couple électromécanique a l'état défaillant $\mu=5\%$ .....	75
<b>Figure 4.3.a</b> Spectre du courant statorique dans l'état défaillant $\mu=10\%$ .....	75
<b>Figure 4.3.b</b> Specter de la vitesse mécanique dans l'état défaillant $\mu=10\%$ .....	76
<b>Figure 4.3.c</b> Specter du couple électromécanique a l'état défaillant $\mu=10\%$ .....	76
<b>Figure 4.4</b> (a) Courants des phases statoriques sain,(b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente) .....	77
<b>Figure 4.5</b> (a) Courants des phases statoriques en présence de défaut $\mu = 15\%$ (b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente).....	79

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure 4.6</b> (a) Courants des phases statoriques en présence de défaut $\mu = 10\%$ , (b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente).....	80
<b>Figure 4.7</b> (a) Courants des phases statoriques en présence de défaut $\mu = 15\%$ , (b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente).....	81
<b>Figure 4.8</b> (a) Courants de phases statoriques «a», (b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente).....	82
<b>Figure 4.9</b> Décomposition multi niveau du courant statorique (ias) état sain.....	84
<b>Figure 4.10</b> Décomposition multi niveau du Courant statorique en présence de défaut $\mu = 5\%$ .....	85
<b>Figure 4.11</b> Décomposition multi niveau du Courant statorique en présence de défaut $\mu = 10\%$ .....	85
<b>Figure 4.12</b> Décomposition multi niveau du Courant statorique en présence de défaut $\mu = 15\%$ .....	86
<b>Figure 4.13</b> Décomposition multi niveau du Court-circuit monophasé on alpique les trois valeurs de $\mu$ (5%, 10% et 15%) à des instants successifs.....	86

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale :

Notre travail consiste à modéliser la machine asynchrone en présence des défauts statorique permettant d'effectuer le diagnostic des défauts pouvant survenir sur cette dernière. La modélisation de systèmes triphasés s'avère insuffisante dans le cas d'une machine en situation de défauts. Alors une modélisation plus fine de la machine a été développée, celle-ci nous a permis d'analyser de manière plus proche de la pratique, l'impact des défauts sur le comportement de la machine.

Au début de ce travail, nous avons présenté la machine asynchrone et les différents défauts qui peuvent altérer le bon fonctionnement de cette machine. Nous avons cité des défauts d'ordre mécanique (excentricité d'arbre...), ainsi que des défauts d'ordre électrique (court-circuit statoriques et rotoriques....).

Dans le deuxième chapitre, avons développé un nouveau modèle triphasé pour l'étude de la machine asynchrone, il permet de simuler le comportement de la machine lors des défaillances statorique.

Ensuite nous avons présenté les différents types de diagnostic et les méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'ondelette.

Nous avons construit un programme de simulation à l'aide du MATLAB 14.a. Ceci nous a permis de visualiser les performances de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine sans et avec défauts (en charge et à vide).

Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statorique...) à l'état sain puis avec défaut de court-circuit statorique et avec mode d'alimentation réseaux.

Afin de représenter le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement normal (état sain) ou avec défaut.

Dans le troisième chapitre on a dévoilé la technique d'ondelette à travers sa théorie et son historique de Fourier vers l'ondelette, on commence par la méthode la plus classique: la TF et on a clarifié leur énorme utilisation dans le traitement du signal puis on est arrivé à montrer sa limitation dans les signaux non stationnaires à travers un exemples d'un signal non stationnaire ensuite on a passé dans la deuxième méthode c'est la transformée de Fourier à fenêtre glissante, lui-même a frustré par le principe d'Heisenberg.

## Conclusion générale

---

On termine cet historique en arrivant à la transformée d'ondelette passant par tous ses types et avantages par rapport à la transformée de Fourier. Enfin on a clôturé par une classification de tous les types d'ondelettes continue et discrète (décomposition multi niveau et par paquet d'ondelette).

Dans le chapitre quatre on a exploité FFT et la technique d'ondelettes pour le diagnostic des défauts de court-circuit entre spires de la MAS.

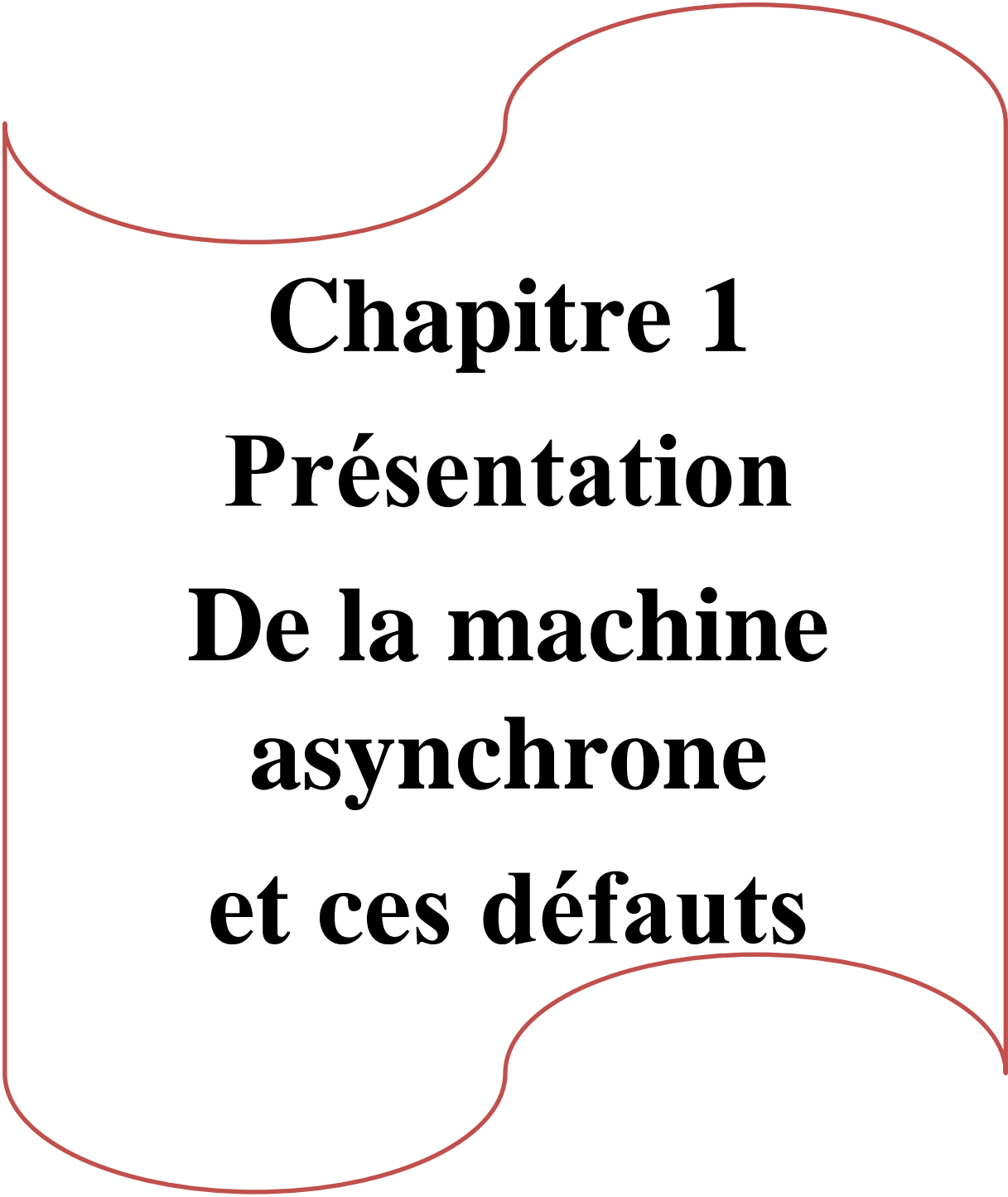
On 'a exploité deux types Transformé d'ondelette

- La transformée en ondelettes continue est faite en trois dimensions (Temps échelle Amplitude).
- La transformée d'ondelettes discrète (décomposition multi niveau )est basée sur l'analyse des signaux à niveau élevé obtenus à partir de la décomposition en ondelettes du signal du courant statorique. Elle est concentrée sur l'étude des signaux d'approximation et de détail résultants de la décomposition en multi-niveau qui contiennent les informations des défauts. Ces signaux permettent la détection de l'évolution des harmoniques caractéristiques liées à la rupture pendant le fonctionnement en charge. Une particularité de la technique des ondelettes, la détection de la non-stationnarité dans un signal est exploitée à travers une décomposition du courant statique.


A decorative red border with a wavy, organic shape, resembling a stylized letter 'S' or a calligraphic flourish, framing the central text.

# **INTRODUCTION GENERALE**



A red decorative border with a wavy, organic shape surrounds the text. It has a rounded top and bottom, with a slight inward curve on the left and right sides.

**Chapitre 1**  
**Présentation**  
**De la machine**  
**asynchrone**  
**et ces défauts**

A red decorative border with a scalloped, wavy top and bottom edge, framing the text.


# **Chapitre 2**

## **Modélisation de la machine asynchrone**

A decorative red border with a wavy, scalloped top and bottom edge, framing the central text.

# **Chapitre 3**

## **Technique des ondelettes**

A red decorative border with a wavy, organic shape surrounds the text. It has a rounded top and bottom, with a slight inward curve on the left and right sides.

**Chapitre 4**  
**Application de la**  
**technique des**  
**ondelettes au**  
**diagnostic**

A decorative red border with a wavy, organic shape, resembling a stylized letter 'S' or a calligraphic flourish, framing the central text.

# **CONCLUSIONS GENERALES**



# **Bibliographies**



# Sommaire





## 1-1 Introduction :

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

L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise sans oublier les pertes de production occasionnées.

Dans les secteurs nucléaire il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes, du matériel et de l'environnement, car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement. [1]

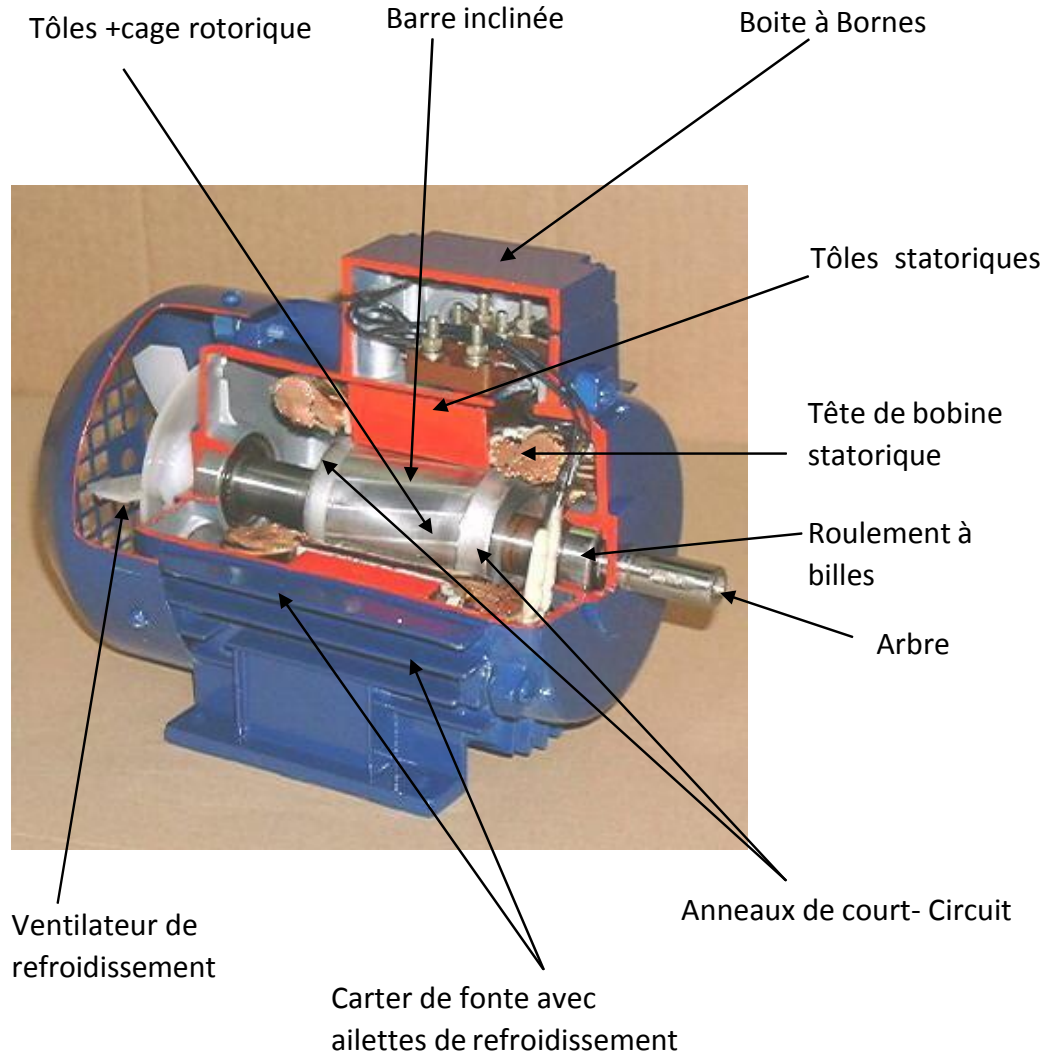
Dans ce premier chapitre, on va présenter :

- Les éléments de constitution d'une machine asynchrone
- Un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans la machine asynchrone à cage d'écureuil et leurs causes.
- Les différentes méthodes de diagnostic d'une machine asynchrone.

## 1-2 Eléments de constitution de la machine asynchrone :

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

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



**Figure 1.1.** Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil [2]

### 1.2.1 Stator:

Le stator de la machine asynchrone schématisée dans la Figure.1.2 est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques.

Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les

## Chapitre 1 Présentation de la machine asynchrone et ces défauts

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

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la figure I.1 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge. [1]



**Figure 1.2** Stator [02]

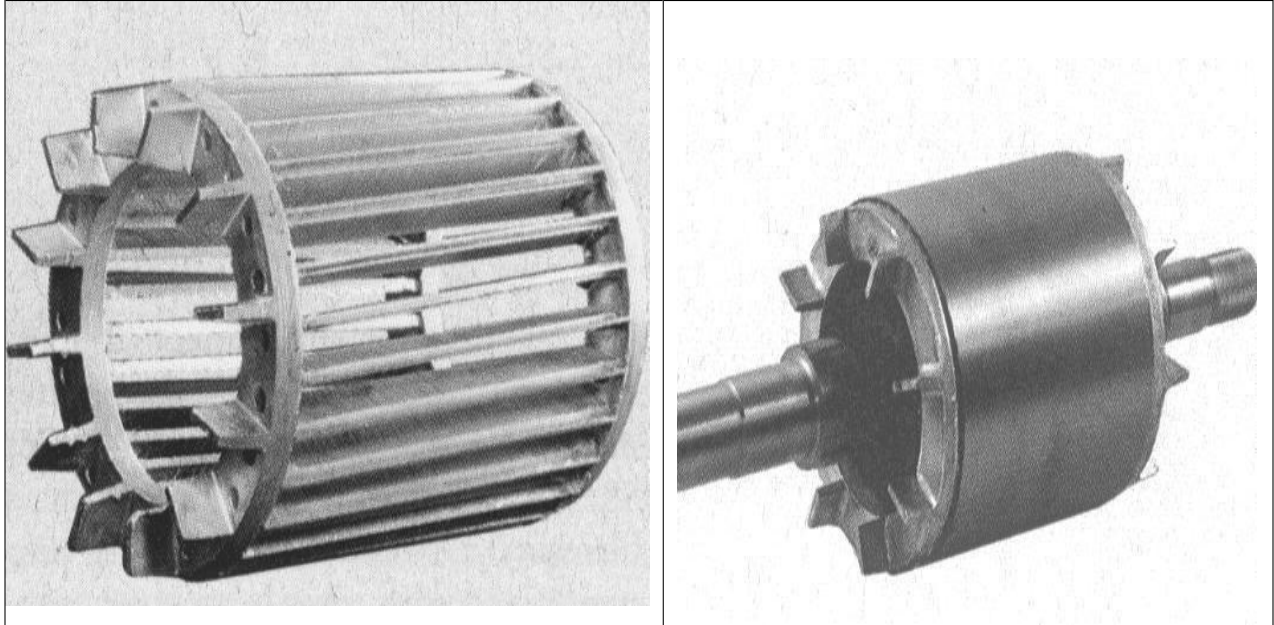
### 1.2.2. Rotor:

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

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les

## Chapitre 1 Présentation de la machine asynchrone et ces défauts

rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium. [01]



**Figure 1.3.** Rotor à cage d'écureuil. [18]

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

Nous donnons une photographie (Figure.1.3) de l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil.

Souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques (biais d'encoches au rotor) et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone.

L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre.

Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre la figure 1.1 . [01]

# Chapitre 1 Présentation de la machine asynchrone et ces défauts

## 1.2.3. Paliers :

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme nous pouvons le visualiser sur la figure 1.4 [01]

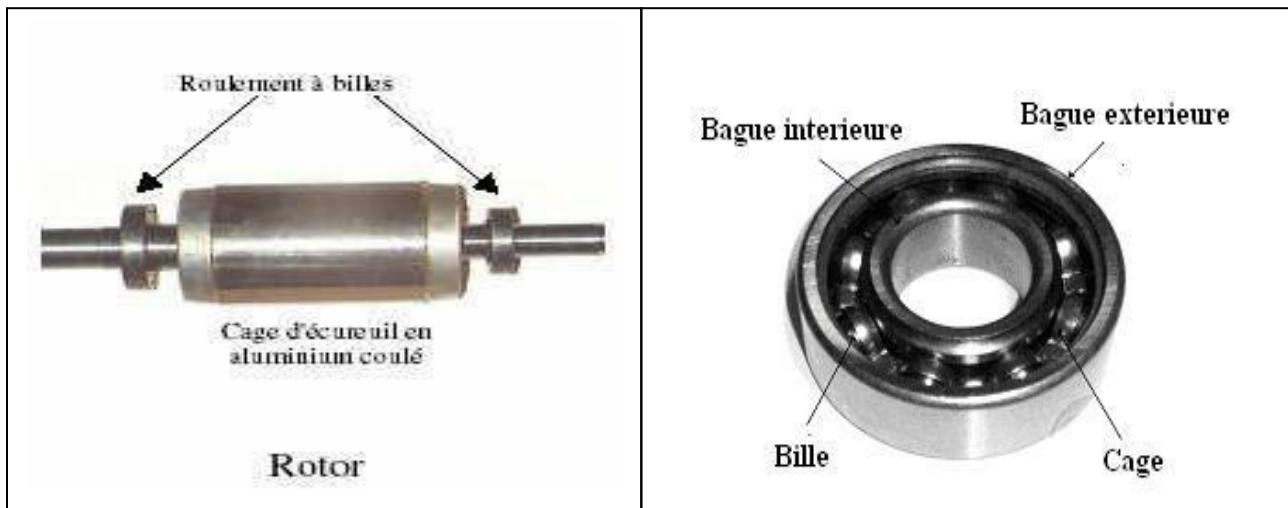


Figure 1.4. PALIERS [02]

## 1-3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le branchement est très simple, trois fils amènent le courant de la ligne à l'enroulement du stator. le rotor est en court-circuit dès que le stator est alimenté par des courants triphasés pulsation  $\omega$ . Il se produit un champ tournant si le bobinage statorique comprend  $2P$  paire de pôles, ce champ tourne à la vitesse angulaire  $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$  dit la vitesse de synchronisme.

Ce champ balaie les conducteurs du rotor et y induit des f.e.m, le rotor étant en court-circuit, ces f.e.m produisent des courants induits. Ces courants placés dans le champ tournant forment un couple .

Le rotor étant libre, ce couple le fait tourner, le sens de rotation est tel que d'après la loi de Lenz, la rotation s'oppose à la cause qui lui donne naissance. Cette cause est le déplacement du champ par rapport aux conducteurs du rotor. [03]

Le rotor tourne donc pour rattraper le champ, soit dans le même sens que le champ, mais il ne peut tourner aussi vite car il n'y aurait plus de déplacement du champ par rapport au rotor, donc plus de courants induits et plus de couple. C'est parce que le mouvement du rotor n'est pas synchrone de celui du champ que ce moteur est dit asynchrone.

## 1-4 Glissement

La f.e.m induite dans le rotor dépend de la vitesse relative des conducteurs du rotor par rapport au champ tournant, cette vitesse est dite vitesse de glissement. Le champ magnétique tourne à la vitesse de synchronisme:  $\omega_s$ . Par définition, le glissement  $g$  d'un moteur asynchrone est le rapport :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s}$$

En fonction de la valeur du glissement, on distingue les différents modes de fonctionnement de la machine asynchrone :

- $g=1$  : Le glissement est de 100%, correspond à vitesse  $\Omega = 0$  donc le rotor est à l'arrêt.
- $0 < g < 1$  : Le glissement correspond à la vitesse  $0 < \Omega < \Omega_s$  donc la machine asynchrone fonctionne en moteur, ce qui est le cas de notre étude.
- $g \approx 0$  : Le glissement est presque nul, correspond à la vitesse  $\Omega \approx \Omega_s$  donc la machine asynchrone fonctionne à vide.
- $g < 0$  : Le glissement est négatif, correspond à la vitesse  $\Omega > \Omega_s$ , ceci est possible au moyen d'un moteur primaire qui fait augmenter la vitesse du rotor. Dans ces conditions la machine asynchrone fonctionne en génératrice, en transformant l'énergie mécanique fournie à son arbre par le moteur primaire en énergie électrique qu'elle livre au réseau. [04]

## 1.5 Défaillances de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est considérée comme robuste et également défaillante dans le cas de son emploi de longue durée et dans des conditions dures. Il est important que les mesures soient prises pour diagnostiquer l'état de la machine au fur et à mesure qu'elle entre dans le mode de défauts. Il est donc nécessaire de faire un contrôle continu, en ligne ou hors ligne, de l'état de la machine. Les raisons derrière les défauts dans les machines électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'installation, l'environnement de fonctionnement, la nature de la charge et le programme de la maintenance.

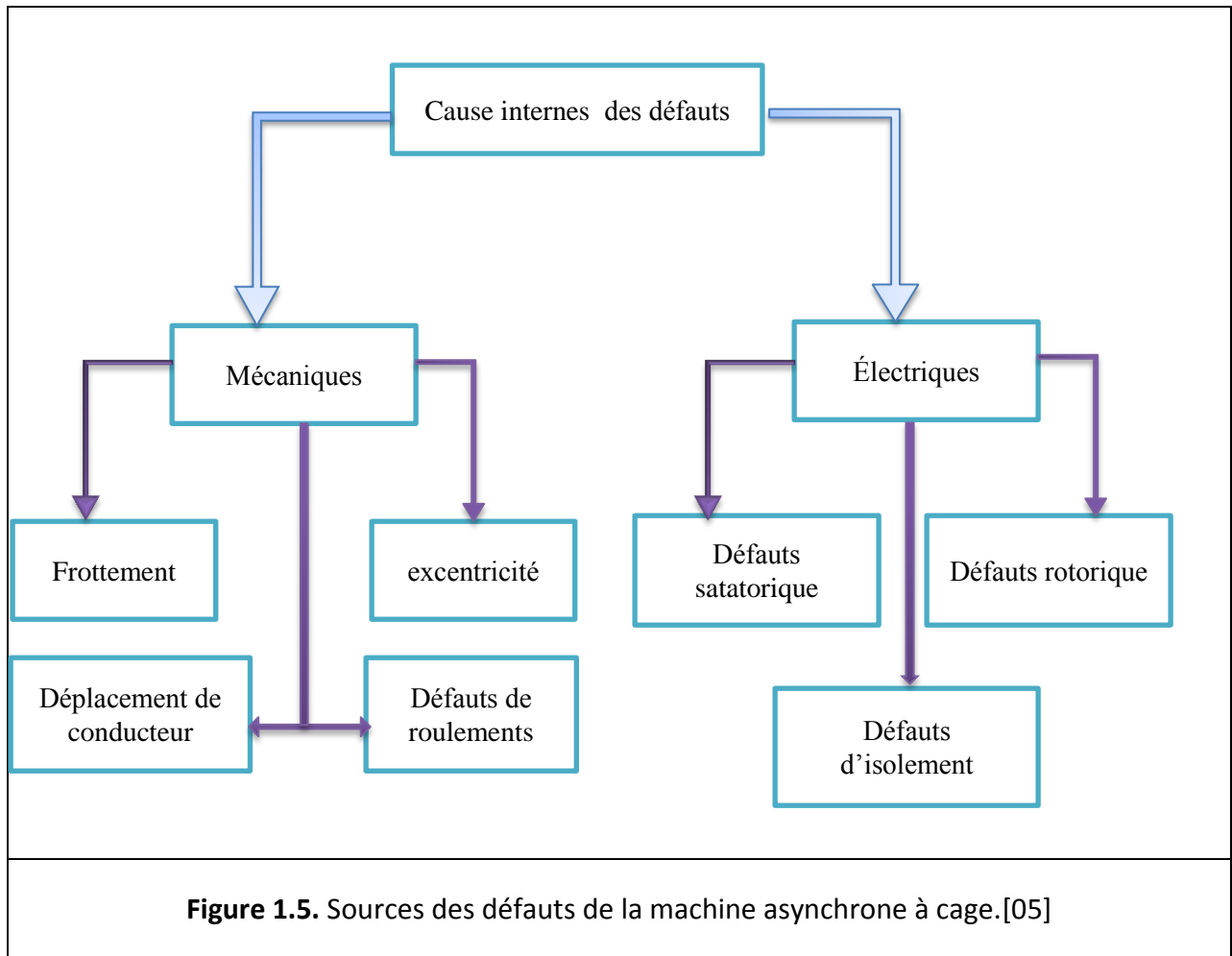
Le moteur asynchrone, comme n'importe quelle autre machine électrique tournante, est soumis aux forces électromagnétiques et mécaniques. La conception du moteur est telle que l'interaction

## Chapitre 1 Présentation de la machine asynchrone et ces défauts

entre ces forces dans des conditions normales mène à un fonctionnement stable avec un bruit et des vibrations minimums. Quand le défaut a lieu, l'équilibre entre ces forces est perdu, aboutissant à un autre perfectionnement du défaut.

Les défauts du les moteurs asynchrones peuvent être classés par catégorie dans deux types : mécaniques et électriques. [07]

Sources des défauts du moteur peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement, comme présenté à la figure 1.5 et figure1.6 Les défauts internes peuvent être classifiés selon leurs origines c'est à dire électriques et mécaniques. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et de refroidissement se rapportent aux défauts du rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles.



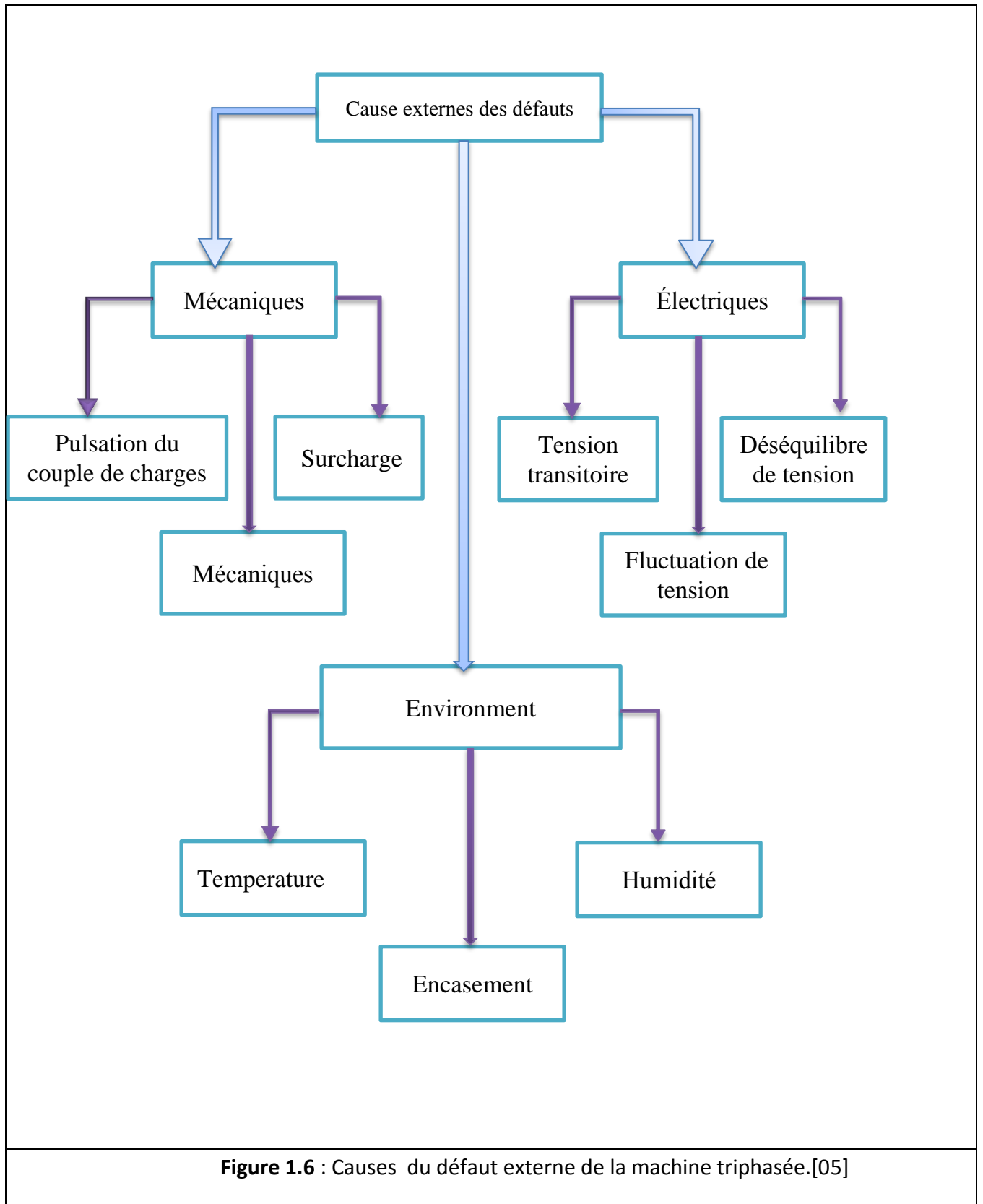


Figure 1.6 : Causes du défaut externe de la machine triphasée.[05]



### 1.5.1 Défaillances d'ordre mécanique :

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

#### 1.5.1.1 Défaillances des roulements:

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations dans la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. L'huile de graissage, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances. [04]

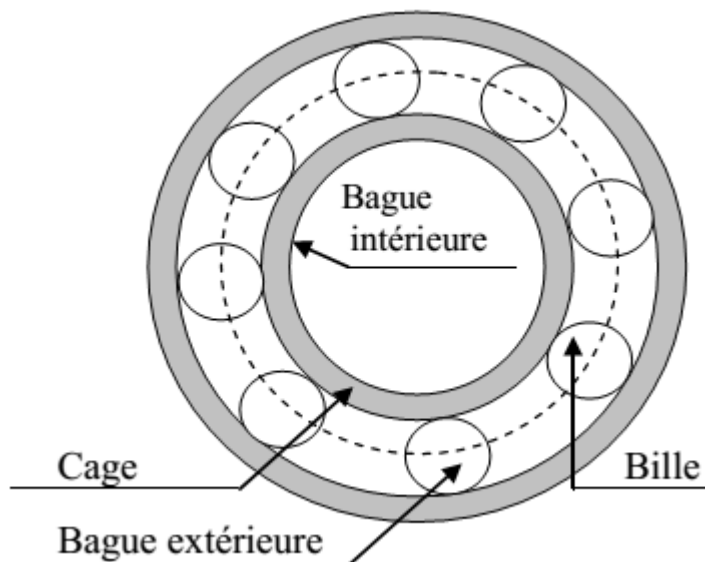
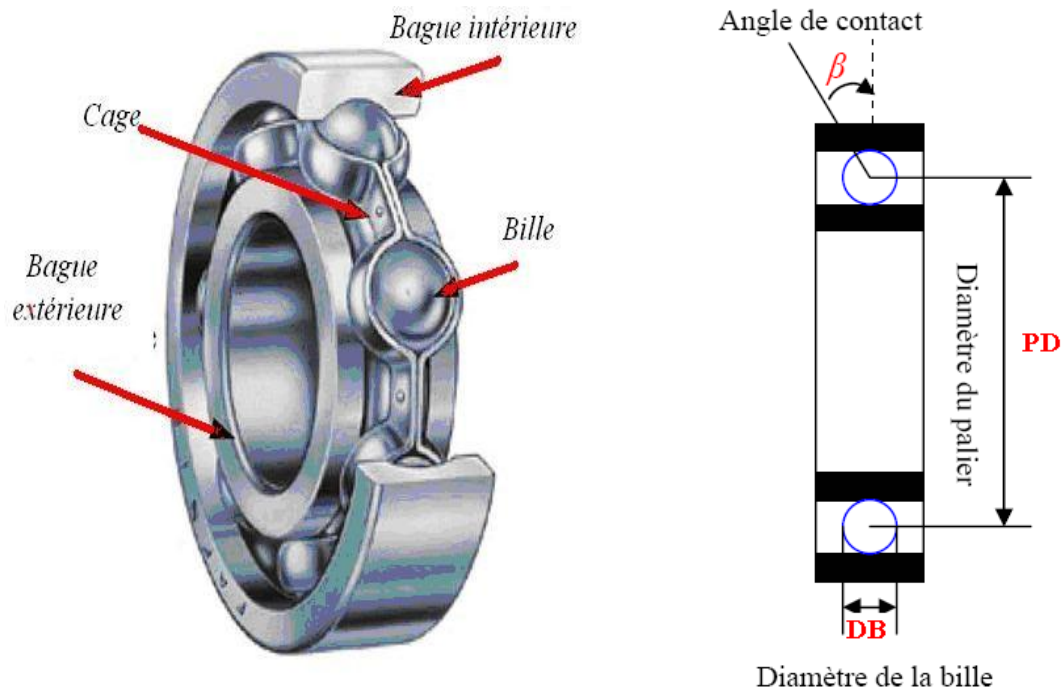


Figure 1.7: roulement à bille. [18]

En présente dans la figure 1.8 le dimensionnement d'un roulement à billes



**Figure 1.8** Dimensions d'un roulement à billes. [05]

La relation entre les vibrations des roulements et les spectres du courant statorique peut être déterminée en rappelant que n'importe quelle excentricité de l'entrefer produit des anomalies dans la densité du flux d'entrefer.

### 1.5.1 .2. Défaillances des flasques :

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.[01]

### 1.5.1 .3. Défaillances de l'arbre :

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. [01]

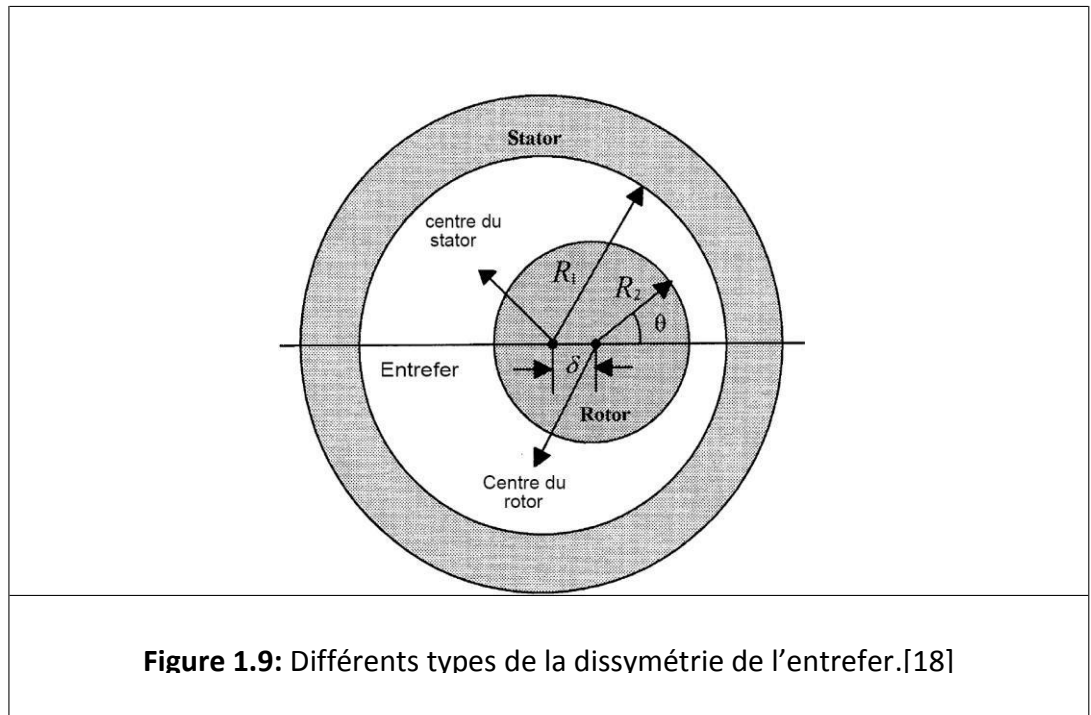
Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.

### 1.5.1 .4. Défauts d'excentricité :

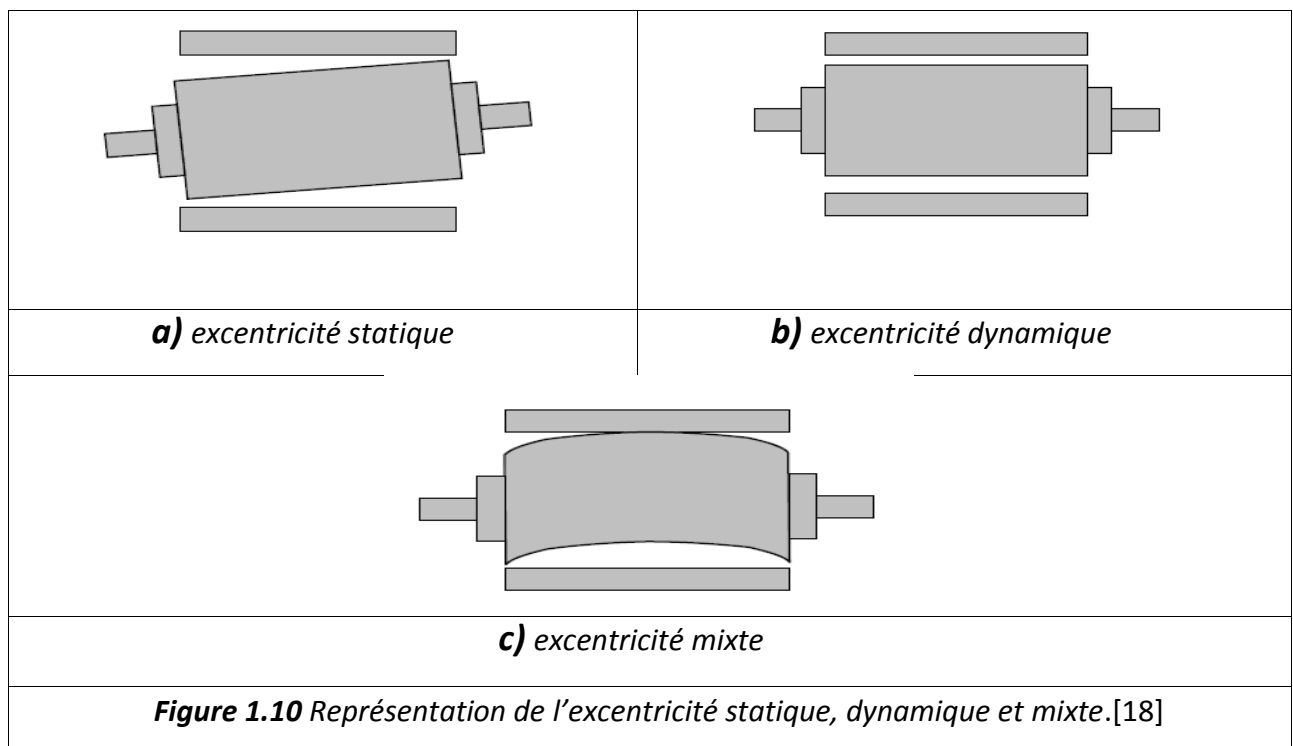
Ceux-ci provoquent la variation de l'entrefer dans le moteur, la répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes créées par le stator avec la bande du frottement du rotor provoquent des dommages du stator et du rotor. [21]

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer (Figures : 1.9 et 1.10) à savoir :

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



Tel que :  $R_1$  : Rayon interne statorique,  $R_2$  : Rayon externe rotorique  $\delta$ : distance entre le centre de rotation et le centre du stator.



### 1.5.2 Défaillances d'ordre électriques :

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, causer l'arrêt définitif de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances sont classées en deux catégories bien distinctes. On peut citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques.[1]

#### 1.5.2.1 Défaut de court-circuit :

La signature fréquentielle de ce défaut se manifeste par l'apparition d'harmonique aux fréquences  $f=n.f_s$  avec  $n = \{1, 2, 3, \dots\}$  et  $f_s$  la fréquence d'alimentation. [20]

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il peut se manifester soit entre les spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre.

##### a. Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut. [05]

##### b. Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections.

## Chapitre 1 Présentation de la machine asynchrone et ces défauts

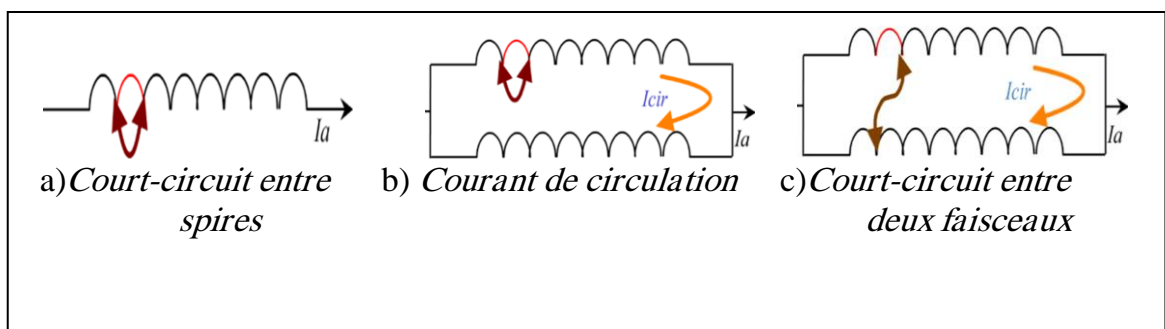
D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases. [07]

### c. Court-circuit phase/bâti :

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance.

Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut. [05]



**Figure 1.11:** Représentation schématique de court-circuit statorique.[19]

### d. Défauts de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc. [05]

### e. Défaillances des circuits électriques rotoriques :

Deux types de défaillances peuvent apparaître au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. La cage étant composée de barres et d'anneaux de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique. L'apparition de ce type de défaut peut être d'origine diverse.

En effet, la rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendants les uns des autres. On peut citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine asynchrone (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne.

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

La fragilité de ces soudures, par rapport aux barres et aux anneaux fabriqués d'un seul bloc, provoque, à ces endroits précis, une fragilité de la cage d'écureuil.

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations. L'effet de la cassure de barres croît rapidement avec le nombre de barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction. La rupture de barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor. En effet ce déséquilibre apparaît sous forme des fréquences qui s'ajoutent au courant statorique de la machine.

## 1-6. Les fonctions de la surveillance :

Un système de surveillance répond généralement vérifier un ensemble de caractéristiques :

- **La détectabilité** : La procédure de détection vise à déterminer l'apparition et l'instant d'occurrence d'une faute. Une panne sera détectable si au moins un résidu permet de la détecter.

Les résidus sont obtenus en comparant des modèles s'exprimant sous la forme d'état et un système réel. Lorsque le modèle permet de représenter exactement le système (aucune erreur de modélisation, connaissance de la nature des signaux inconnus agissant sur le système, ...) alors les résidus générés seront strictement égaux à zéro en fonctionnement normal et différent de zéro en présence de pannes (on prend en considération les fausses alarmes). La procédure de détection se résumera alors à déclencher une alarme lorsqu'au moins un résidu différera de zéro.

En pratique, les modèles que nous utilisons sont obtenus à partir d'hypothèses simplificatrices et sont donc imparfaits. Les résidus (qui reflètent l'écart entre le modèle et le système) ne sont plus parfaitement égaux à zéro.

Le processus de détection le plus simple consiste à comparer une caractéristique statistique des résidus (moyenne ou écart type) à un seuil. Une alarme est déclenchée à chaque franchissement de ce seuil.

- **La localisation** : Durant la dernière décennie, un effort notable a porté sur l'amélioration des performances des systèmes de surveillance par l'utilisation des méthodes de l'automatique moderne et de l'informatique industrielle.

Aujourd'hui, les outils de la sûreté de fonctionnement, la surveillance et le diagnostic appliqués aux dispositifs tels que les machines électriques permettent d'envisager la mise en oeuvre de techniques de suivi en ligne du fonctionnement par la détection précoce des dysfonctionnements et ensuite la localisation de défauts. [01]

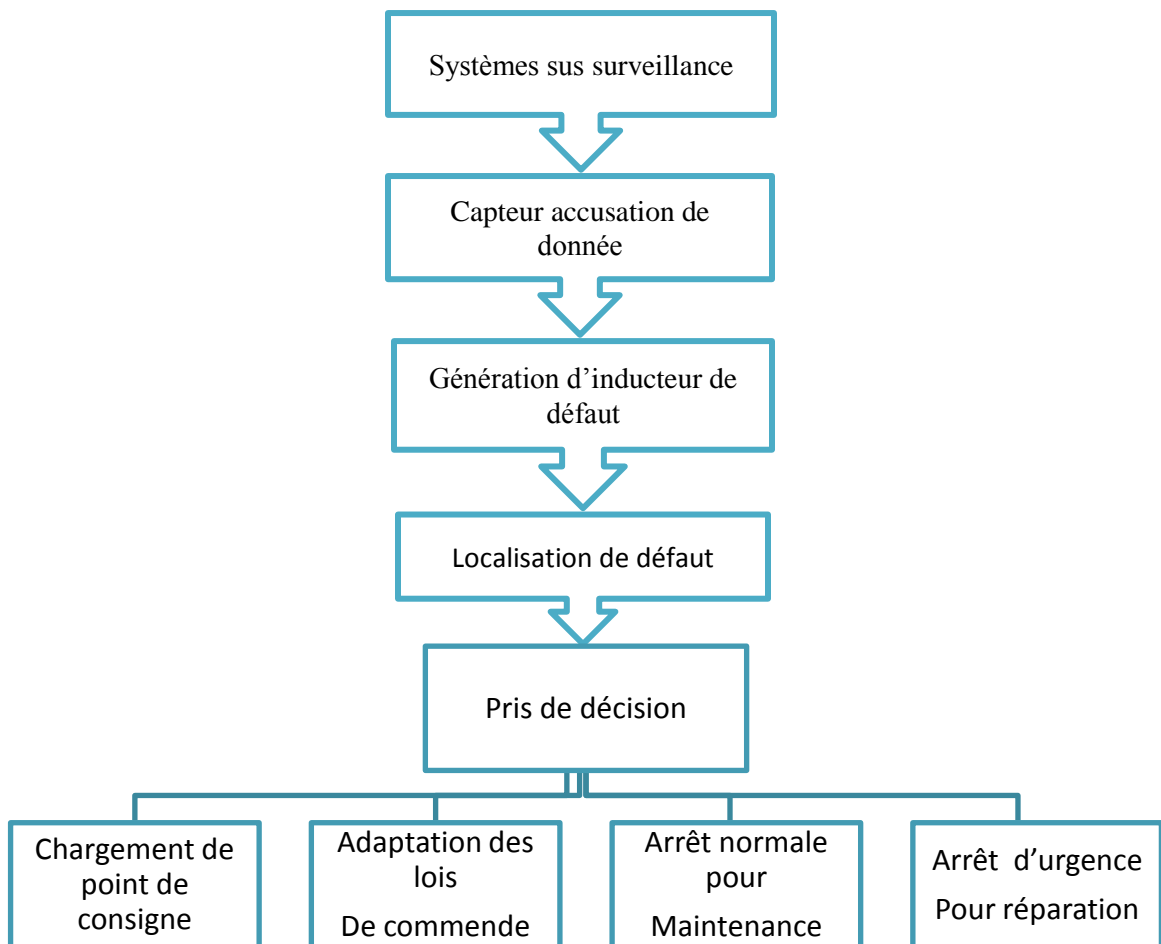
Lorsqu'une panne est détectée, une procédure de localisation est utilisée pour permettre de déterminer l'origine de celle-ci. A la différence de la détection où un seul résidu est nécessaire, la procédure de localisation nécessite un ensemble (ou vecteur) de résidus...



## Chapitre 1 Présentation de la machine asynchrone et ces défauts

- **La sensibilité** : Elle caractérise l'aptitude de la procédure à détecter des fautes d'amplitude donnée. Elle dépend surtout de l'amplitude relative du bruit de mesure par rapport à celle du défaut à détecter.
- **La robustesse** : C'est l'aptitude de la procédure à détecter les fautes indépendamment des erreurs de modèle du processus et des perturbations extérieures.

**La rapidité de la détection** : Elle se définit d'elle-même ; c'est un impératif à prendre en compte lorsque le diagnostic doit être établi en temps réel. [01]



**Figure 1.12** Les différent étape de diagnostic.[05]

## 1.7 Méthodes de diagnostic:

Le raisonnement et la connaissance sont deux éléments clés dans la solution d'un problème. Le diagnostic est au niveau conceptuel une distribution systématique des symptômes en diverses catégories de défauts. Par rapport à la connaissance et au raisonnement deux grandes classes des méthodes de diagnostic existent :

- les méthodes internes et externes.
- les méthodes inductives et déductives

### 1.7.1 Méthodes externes :

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit à la machine lors de son fonctionnement, les signaux utilisables qui peuvent être :

Flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibration acoustique. [05]

### 1.7.2 Méthodes internes :

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet, ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèle mathématique, ces méthodes utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système.

On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé.

- Modèle de simulation : les modèles analytiques utilisés dans ce mode sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert.
- Observateur (estimateur) ce modèle est décrit sous une représentation de variable d'état.
- Estimation paramétrique : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système.
- Modélisation des signaux : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts

l'analyse spectrale est très utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques.

### **1.7.3 Méthodes inductives :**

Elles correspondent à une approche montante ou recherche en avant, il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système, ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leur combinaison afin de trouver le défaut.

### **1.7.4 Méthodes déductives :**

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système.

Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer l'existence d'un défaut.

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière) dans ce dernier cas le raisonnement est appelé mixte ou avant arrière . [05]

## **1-8. Détection des défauts par traitement du signal :**

Les caractéristiques des signaux fournis par des capteurs sont les données disponibles contenant les informations pertinentes pour le diagnostic. Les méthodes de diagnostic à base de traitement de signal associent, suite à l'analyse des signaux, des signatures propres au fonctionnement sain ou défaillant du système surveillé. La précision de l'analyse effectuée est essentielle pour une bonne décision suite au diagnostic. Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les transformées de Fourier, les fonctions d'auto corrélation ou la densité spectrale. [01]

Parmi les approches existantes, les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'un défaut. Il faut également citer les méthodes temps-fréquence qui peuvent être, dans certain configuration, plus riche que l'analyse spectrale, citons comme exemple FFT et les ondelettes.

# Chapitre 1 Présentation de la machine asynchrone et ces défauts

---

## 1-8.1 Transformé de Fourier rapide (FFT): [07]

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

## 1-8.2 Technique d'ondelettes : [01]

L'application de la transformée d'ondelette continue (TOC) et discrète (TOD) aux diagnostics des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil est basé sur les signaux électriques tels que les courants statoriques, tension statorique, vitesse, ou signaux de vibration de la machine ...etc. Notre choix est porté sur le courant statorique puisque Les signatures du courant statorique représentent une source très riche en informations concernant les défauts qui se manifestent souvent dans la machine asynchrone, à cet effet la majorité des travaux de diagnostic sont fondés sur l'analyse du courant statorique soit dans sa partie transitoire ou dans sa partie permanente.

## 1.9 Conclusion :

Nous avons, dans ce chapitre, donne quelques rappels sur la constitution de la machine asynchrone. Nous nous sommes volontairement attardés sur les bobinages statoriques en détaillant les différents défauts fréquemment rencontrés. Nous avons dénombré les principaux défauts qui peuvent survenir soit dans la phase de fabrication, soit dans celle d'utilisation.

Nous avons brièvement rappelé quelques techniques de diagnostic des processus industriels et plus particulièrement relatives à la machine asynchrone. Nous avons également présentée une méthode couramment utilisée pour la surveillance de la machine asynchrone, en l'occurrence l'analyse spectrale des signaux électriques. Les outils exposés dans cette partie seront repris ultérieurement afin de valider l'ensemble des modèles de défauts statoriques et rotoriques.



## 2-1 Introduction

la modélisation des machines électriques est une étape aussi bien pour le Concepteur. Elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs Électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration d'un diagnostic. Un modèle basé sur les équations électriques et mécaniques des circuits est en général suffisant pour faire la synthèse du diagnostic. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de Simulation courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable.

La modélisation des machines électriques est une phase primordiale pour l'élaboration des lois de commande. En effet, aborder la commande des machines électriques nécessite l'emploi d'une méthode de modélisation adaptée à la commande. Il s'agit d'une application simple des méthodes de modélisation modernes de la machine asynchrone, qui présentent des spécificités propres, qui ne sont pas nécessairement communes à d'autres processus physiques. Il est donc évident que cette étape de modélisation soit un passage obligé pour concevoir des systèmes de commande performants et adaptés aux variateurs de vitesse. De nos jours, de nombreuses publications et ouvrages spécialisés présentent ces techniques de modélisation. actuellement les moteurs asynchrones sont les plus répandus, vu les avantages qu'ils présentent pour les systèmes triphasés d'alimentation d'une part, et d'autre part pour les avantages du moteur lui-même, parmi les quels on doit remarquer sur tout :

- L'absence des contraintes mobiles.
- Bonnes caractéristiques de fonctionnement.
- Construction simple.
- Robustesse.
- Simplicité d'entretien.
- Prix de revient, service commode et économique.

La machine la plus répandue comporte trois bobines au stator connecté en tringle ou en étoile, et dont les axes divisent le tour du stator en trois parties égales. Il est identique à celui de la machine synchrone. [20]

## ❖ Hypothèses simplificatrices

L'étude de la modélisation de la machine asynchrone est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices :

- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et il n'y a pas de phénomène d'effet de peau.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé.
- Le système d'alimentation sera un système équilibré et sinusoïdal

On admettra de plus que la force magnétomotrice, créée par les enroulements statoriques et rotoriques, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer. Cette hypothèse, jointe à la constance de la perméance de l'entrefer (on rappelle que l'on néglige l'effet d'encoche), conduit à des expressions assez simples des valeurs des inductances de la machine en fonction des paramètres de celle-ci (longueur, rayon, etc.) . [05]

## 2-2 Modèle d'une machine asynchrone triphasée sain :

La machine asynchrone, sujet de la présente étude, est représentée schématiquement par la Figure. 2.1

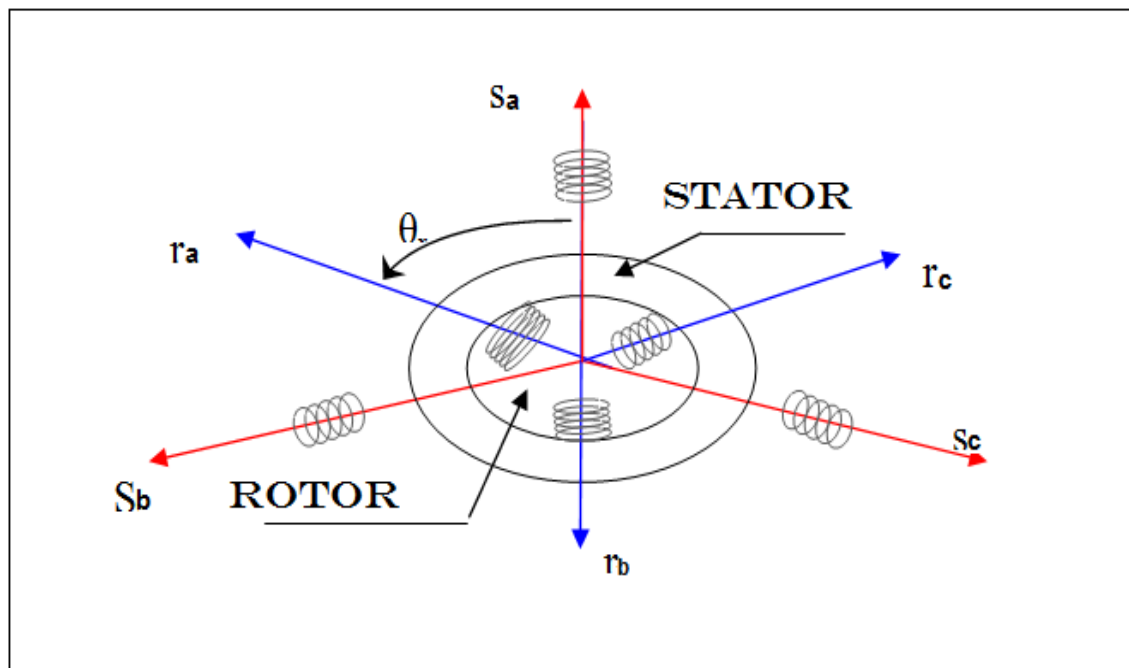


Figure. 2.1 Modèle généralisée de la MAS triphasée [06]

### 2-2-1 Equations des tensions

Avec les hypothèses décrites précédemment, les équations des tensions des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent alors :

#### a. Stator

$$\begin{cases} v_A = R_s \cdot i_A + \frac{d}{dt} \phi_A \\ v_B = R_s \cdot i_B + \frac{d}{dt} \phi_B \\ v_C = R_s \cdot i_C + \frac{d}{dt} \phi_C \end{cases} \quad (2.1)$$

#### b. Rotor

$$\begin{cases} v_a = R_s \cdot i_a + \frac{d}{dt} \phi_a \\ v_b = R_s \cdot i_b + \frac{d}{dt} \phi_b \\ v_c = R_s \cdot i_c + \frac{d}{dt} \phi_c \end{cases} \quad (2.2)$$

En désignant par :

$v_A, v_B, v_C; i_A, i_B, i_C; \phi_A, \phi_B, \phi_C; R_s$  : tension, courant, flux, résistance statorique, respecté.

$v_a, v_b, v_c; i_a, i_b, i_c; \phi_a, \phi_b, \phi_c; R_r$  : tension, courant, flux, résistance rotorique, respecté.

$\frac{d}{dt}$  : l'opérateur de dérivation.

En notant que les indices A,B,C font références au stator et les indices a,b,c au rotor.

### 2-2-2 Equations de flux :

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Avec

$$\phi_s = \begin{bmatrix} \phi_A \\ \phi_B \\ \phi_C \end{bmatrix} \quad ; \quad \phi_r = \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix}$$

Pour une représentation plus condensée on pose :

$$[L(\theta)] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (2.4)$$



### 2-2-3 Equations mécanique et du couple électromagnétique

$$J_t \frac{d[\Omega_r]}{dt} + f_v \Omega_r = C_e - C_r \quad (2.5)$$

$$C_e = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d[\theta]} \cdot [I] \quad (2.6)$$

$$\Omega_r = \frac{d[\theta]}{dt} \quad (2.7)$$

où

$\Omega$  : la vitesse de rotation de la machine.

$[I]=[i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]^t$  : le vecteur courant .

$\theta$  : la position du rotor par rapport au stator .

$$[\phi] = [L][I]$$

En posant  $[v]=[v_s][v_r]$  et en sachant que le vecteur  $[v_r]$  est nul, nous obtenons pour l'équation électrique de la machine asynchrone :

$$\begin{aligned} [V] &= [R][I] + \frac{d([L][I])}{dt} \\ [V] &= [R][I] + [I] \cdot \frac{d[L]}{dt} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (2.8) \\ [V] &= [R][I] + [I] \cdot \frac{d[\theta]}{dt} \cdot \frac{d[L]}{d[\theta]} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \\ [V] &= [R][I] + [I] \cdot \Omega_r \cdot \frac{d[L]}{d[\theta]} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \end{aligned}$$

Ces équations peuvent être regroupées sous une forme matricielle tel que :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ([R] + \Omega_r \cdot \frac{d[L]}{d[\theta]}) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}[I]^T \cdot \frac{d[L]}{d[\theta]} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{[I]} \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Une forme simplifiée ou condensée est alors :

$$[U] = [B][X] + [A][\dot{X}] \quad (2.10)$$

le vecteur  $[\dot{X}]$  peut être calculé par :

$$[\dot{X}] = [A]^{-1}[U] - [A]^{-1}[B][X] \quad (2.11)$$

où

$[U] = ([V] \ [-C_r] \ [0])^T$  : le vecteur de commande.

$[X] = ([I] \ [\Omega_r] \ [\theta])^T$  : le vecteur d'état.

La matrice [A] obtenue s'écrit sous la forme : [4]

$$[A] = \begin{bmatrix} [L_{SS}] & [M_{sr}] & 0 & 0 \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

La matrice [A] est dépendante de l'angle rotorique et il nous faudra l'actualiser pour ensuite l'inverser à chaque pas de calcul lors de la simulation.

Les diverses matrices constituant [A] sont :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = \begin{bmatrix} M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 \\ M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 \\ M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Où :

$$f_1 = \cos(P \cdot \theta)$$

$$f_2 = \cos(P\theta + 2 * \frac{\pi}{3}) \quad (2.16)$$

$$f_3 = \cos(P\theta - 2 * \frac{\pi}{3})$$

Dans les équations (2.3–2.16) on a :

P : le nombre de paire de pôle de la machine asynchrone.

[L<sub>ss</sub>] : la matrice spécifique au stator comprenant :

L<sub>s</sub> : Inductance propre d'un enroulement statorique.

M<sub>s</sub> : l'induction mutuelle entre deux enroulements statorique.

[L<sub>rr</sub>] : Ma trice spécifique au rotor comprenant :

L<sub>r</sub> : Inductance propre d'un enroulement rotorique.

M<sub>r</sub> : l'induction mutuelle entre deux enroulements.

[M<sub>sr</sub>] : Induction mutuelle entre les enroulements statorique et rotorique avec

M<sub>sr</sub> : Inductance mutuelle maximum entre un enroulement statorique et un enroulement rotorique.

La matrice [A] est dépendante de l'angle  $\theta$  et il nous faudra l'actualiser pour ensuite l'inverser à chaque pas de calcul lors de la simulation.

En considérant le cas où le stator et le rotor ont le même nombre de spires en série par phase, que les bobinages sont identiques et que le moteur est connecté en étoile au réseau électrique, il vient alors :

$$M_S = -\frac{1}{2}L_S = M_R = -\frac{1}{2}L_S \quad , i_A + i_B + i_C = 0, i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.17)$$

En introduisant l'inductance cyclique  $L_{sc}=3/2 L_s$ , la matrice inductance [L] de la machine asynchrone peut se réécrite sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & 0 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 \\ 0 & L_{sc} & 0 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 \\ 0 & 0 & L_{sc} & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 \\ M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 & L_{rc} & 0 & 0 \\ M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 & 0 & L_{rc} & 0 \\ M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 & 0 & 0 & L_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

La matrice [B] prendra la forme :

$$B = \begin{bmatrix} [R_s] & \left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] & 0 & 0 \\ \left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{rs}}{d\theta} \right] & [R_r] & 0 & 0 \\ C_1 \dots & \dots C_6 & f_v & 0 \\ 0 \dots & \dots 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

avec

$$[R_s]=R_s[//]$$

$$[R_r]=R_r[//]$$

ou [//] : représente la matrice identité d'ordre trois (03).

D'autre parte, les deux autres matrices contenues dans [B] s'écrivent :

$$\left[ \Omega_r \quad \frac{dM_{rc}}{d\theta} \right] = \left[ \Omega_r \quad \frac{dM_{rc}}{d\theta} \right]^t = \begin{bmatrix} -M_{sr}g_1 & -M_{sr}g_2 & -M_{sr}g_3 \\ -M_{sr}g_3 & -M_{sr}g_1 & -M_{sr}g_2 \\ -M_{sr}g_2 & -M_{sr}g_3 & -M_{sr}g_1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

avec :

$$g_1 = \Omega_r p \sin(p \cdot \theta)$$

$$g_2 = \Omega_r p \sin(p \cdot \theta + 2 * \pi/3)$$

$$g_3 = \Omega_r p \sin(p \cdot \theta - 2 * \pi/3)$$

Les éléments  $C_1, \dots, C_6$  contenus dans la matrice [B], sont :

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 0,5 \cdot M_{sr} \cdot P(i_a h_1 + i_b h_2 + i_c h_3) \\
 C_2 &= 0,5 \cdot M_{sr} \cdot P(i_a h_3 + i_b h_1 + i_c h_2) \\
 C_3 &= 0,5 \cdot M_{sr} \cdot P(i_a h_2 + i_b h_3 + i_c h_1) \\
 C_4 &= 0,5 \cdot M_{sr} \cdot P(i_A h_1 + i_B h_3 + i_C h_2) \\
 C_5 &= 0,5 \cdot M_{sr} \cdot P(i_A h_2 + i_B h_1 + i_C h_3) \\
 C_6 &= 0,5 \cdot M_{sr} \cdot P(i_A h_3 + i_B h_2 + i_C h_1)
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Avec :

$$h_1 = \sin(P\theta)$$

$$h_2 = \sin\left(P\theta + 2\frac{\pi}{3}\right)$$

$$h_3 = \sin\left(P\theta - 2\frac{\pi}{3}\right)$$

## 2-3 Modèle de la machine asynchrone triphasée à cage :( avec défaut)

### 2-3-1 Les défauts statorique :

#### ➤ Court-circuit dans une phase

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il peut se manifester soit entre des spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre.

Si nous considérons que le court-circuit se manifeste au milieu du bobinage, il n'y a aucun changement sur le couple délivré par la machine. Une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée apparaît et une légère variation de l'amplitude est constatée pour les autres phases . [05] La différence marquante par rapport au court-circuit relié au neutre est la dissymétrie entre les courants des phases non affectées par le défaut. Ceci s'explique par le déséquilibre dû au déplacement du neutre entre les trois phases .

#### ❖ Pour la modélisation ou le stator est défaillant

Soit  $f_{sa}, f_{sb}$  et  $f_{sc}$  les pourcentages de réduction du nombre de spires aux trois phases A, B et C du stator .

$$\begin{aligned}
 \text{Soit les coefficients } f_{sa}^* &\triangleq 1 - f_{sa} \\
 f_{sb}^* &\triangleq 1 - f_{sb} \\
 f_{sc}^* &\triangleq 1 - f_{sc}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Les matrices  $[R_S]$ ,  $[L_{sc}]$ ,  $[M_S]$ ,  $[M_{sr}]$  et  $[M_{rs}]$  dépendent des trois coefficients  $f_{sa}^*$ ,  $f_{sb}^*$ ,  $f_{sc}^*$ . On montre, à partir des expressions des paramètres en fonction du nombre de spires des phases considérées, que l'on a :

$$[R_S] = R_S \begin{bmatrix} f_{sa}^* & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb}^* & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc}^* \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$[L_{sc}] = \begin{bmatrix} f_{sa}^{*2} L_{sc} & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb}^{*2} L_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc}^{*2} L_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$[M_S] = M_S \begin{bmatrix} f_{sa}^{*2} & -f_{sa}^* f_{sb}^*/2 & -f_{sa}^* f_{sc}^*/2 \\ -f_{sa}^* f_{sb}^*/2 & f_{sb}^{*2} & -f_{sb}^* f_{sc}^*/2 \\ -f_{sa}^* f_{sc}^*/2 & -f_{sb}^* f_{sc}^*/2 & f_{sc}^{*2} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$[M_{sr}] = [M_{sr}] \begin{bmatrix} f_{sa}^* \cos \theta & f_{sa}^* \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & f_{sa}^* \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ f_{sb}^* \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & f_{sb}^* \cos \theta & f_{sb}^* \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ f_{sc}^* \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & f_{sc}^* \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & f_{sc}^* \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Avec  $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$

Dans le cas où les enroulements de stator sont tous identiques, c'est-à-dire lorsque la machine est équilibrée, les trois coefficients  $f_{sa}^*$ ,  $f_{sb}^*$  et  $f_{sc}^*$  sont égaux à 1. On retrouve alors le modèle triphasé équivalent classique.

$R_r$ ,  $L_{rc}$ ,  $M_r$ ,  $R_s$ ,  $L_{sc}$  et  $M_s$  sont des paramètres constants. Leurs valeurs peuvent être déterminées soit en connaissant les caractéristiques physiques de la machine équilibrée (données constructeur), soit par des essais expérimentaux, soit encore par des procédures d'identification.

Lorsque le rotor est en rotation, les coefficients de matrice  $[M_{sr}]$  et  $[M_{rs}]$  ne sont pas constants. Ils varient en fonction de  $\theta$ , position angulaire entre le rotor et le stator, dont la valeur est inconnue en pratique. Ceci rend le modèle triphasé équivalent difficilement utilisable tant en commande qu'en surveillance.

**2-4 Resultat Simulation avec l'alimentation directe par réseau triphasé :**

**Remarque :** le couple résistant  $C_r$  utilisé dans les essais ne représente pas une charge nominale suivant le cahier des charges de la machine.

Les tensions appliquées aux trois bobinages statoriques sont :

$$v_A = 310 \sin(\omega_s t)$$

$$v_B = 310 \sin(\omega_s t - 2 * \pi/3)$$

$$v_C = 310 \sin(\omega_s t + 2 * \pi/3)$$

Où  $\omega_s$  représente la pulsation des trois tensions appliquées.

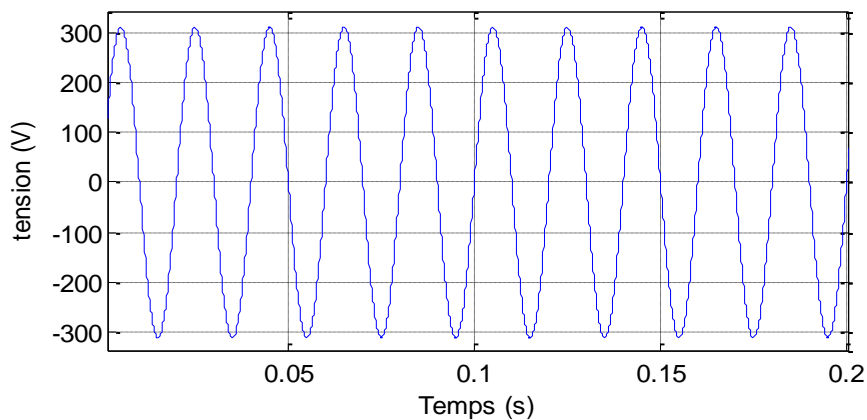
**A. Présentation des résultats dans le régime normale (moteur sain):**

- Essai à vide :

Temps de simulation  $t=3\text{sec}$ . Et la charge est nulle ( $C_r = 0\text{N.m}$ )

Lorsque l'essai du moteur sain nous avons représenté résultats dans les figures suivant:

- La tension de réseaux



**Figure. 2.2** La tension de réseau

➤ Les courants statorique

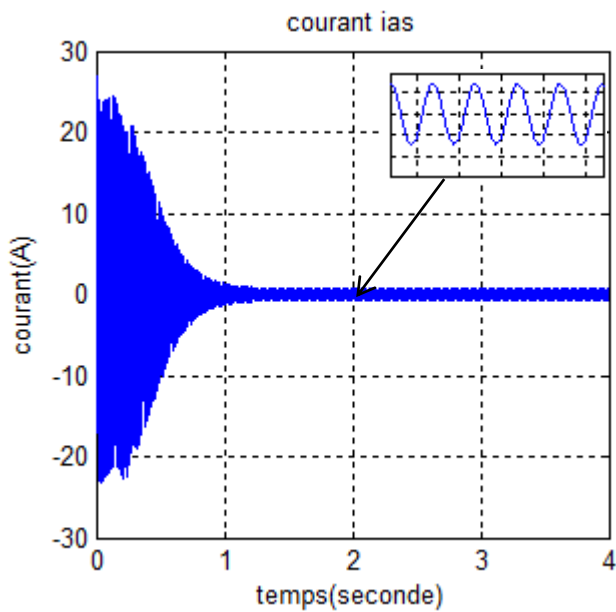


Figure. 2.3. Courant de la phase A

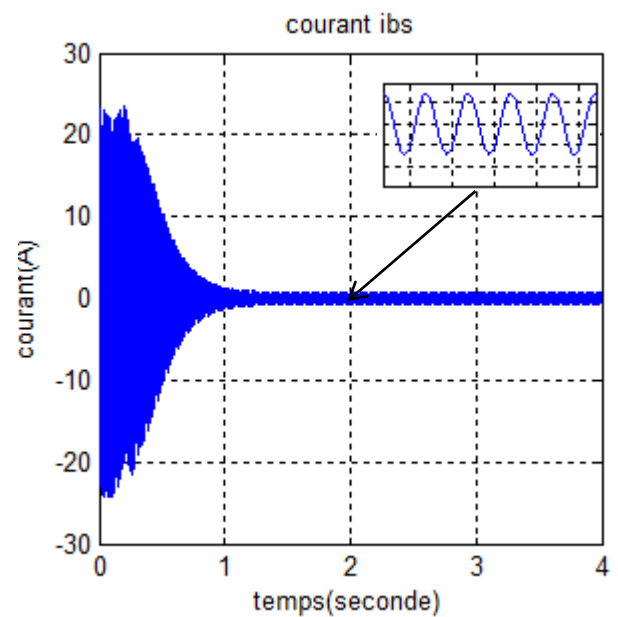


Figure. 2.4. Courant de la phase B

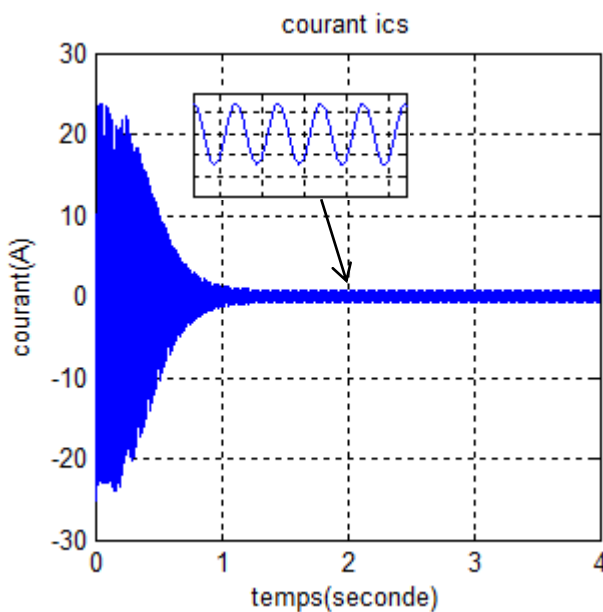


Figure. 2.5. Courant de la phase C

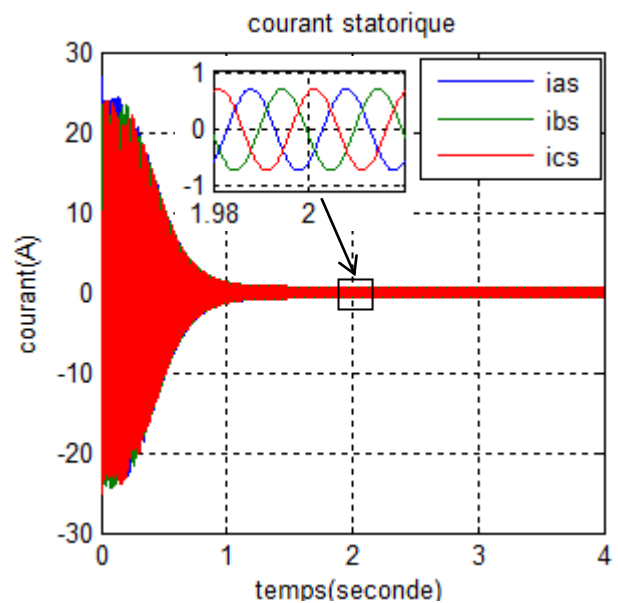


Figure.2.6 Courants statoriques

Les courants résultants sont des courants sinusoïdaux proches aux courants réels. Nous constatons à partir des figures 2.[3.4.5] présentant l'évolution des courants statoriques en absence de défauts statoriques que le moteur subit un allongement de régime transitoire pour les courants ce dernier durera presque (0.5 sec) (Après un fort courant de démarrage) avant que le moteur entre dans le régime stationnaire (permanent).

➤ Le courant rotorique, le couple et la vitesse :

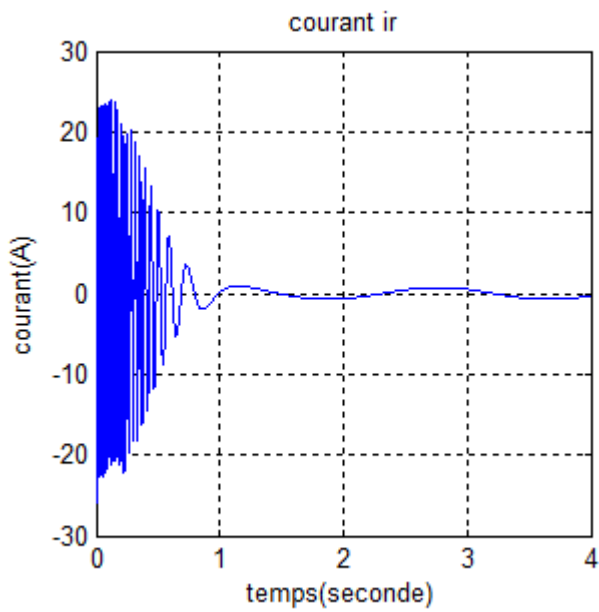


Figure. 2.7. le courant rotorique

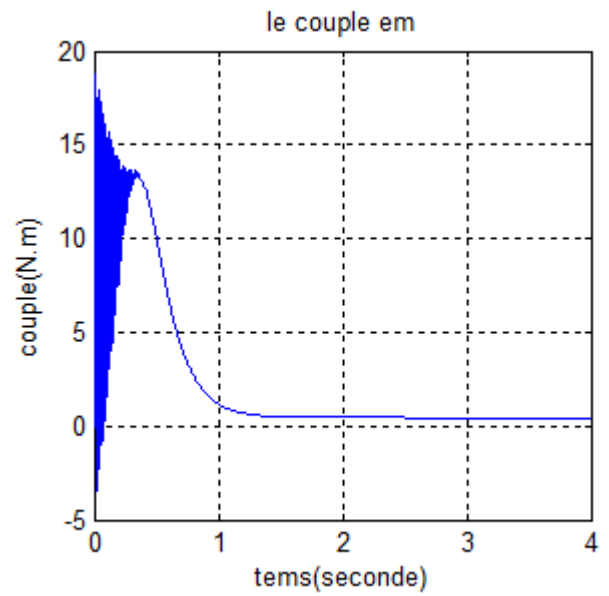


Figure. 2.8. Le couple électromagnétique

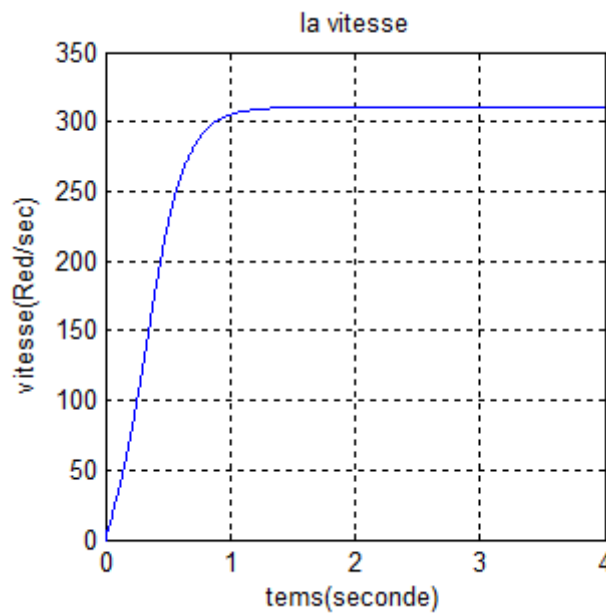


Figure.2.9. la vitesse mécanique

Même pour la vitesse et le couple, dans le régime permanent La vitesse atteint presque la vitesse de synchronisme (314rad/s), dans le régime transitoire le couple atteint une valeur maximale avant de se stabiliser à une valeur nulle en régime permanent.



❖ Essai en charge :

1. Temps de simulation  $t=4\text{sec}$ .
2. Application de la charge  $C_r = 0.5N.m$  à  $t=0\text{sec}$  (démarrage en charge) et  $C_r = 3N.m$  à  $t=2\text{sec}$ .

Lorsque l'essai du moteur sain en charge nous avons représenté résultats dans les figures suivant:

➤ Les courants statorique

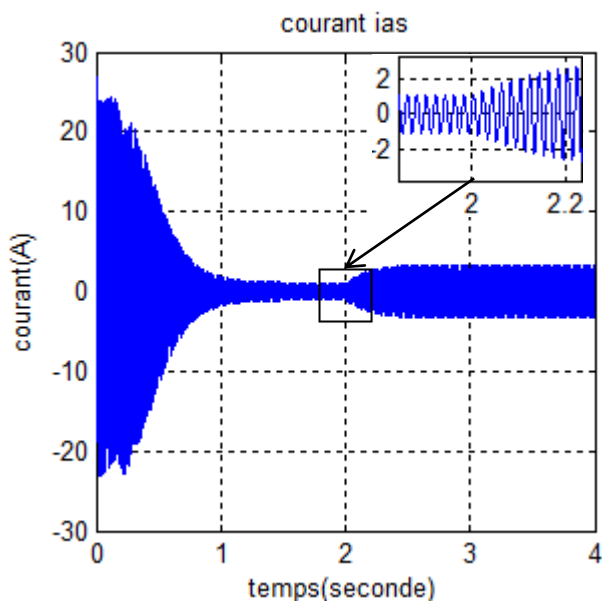


Figure. 2.10 .Courant de la phase A

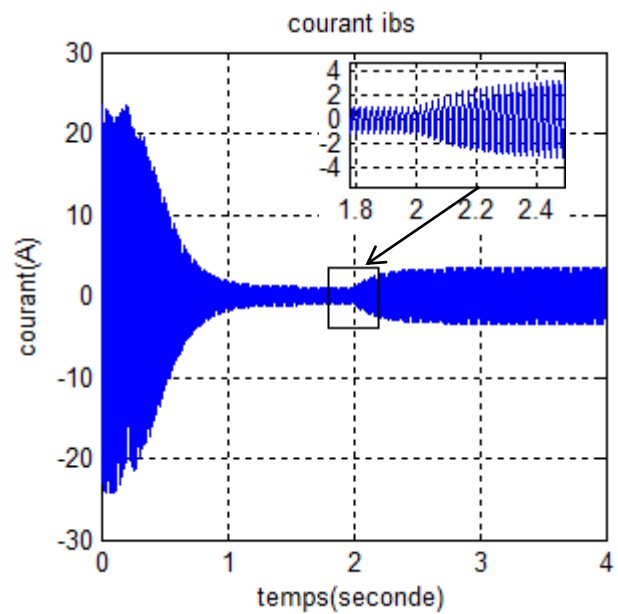


Figure.2.11 .Courant de la phase B

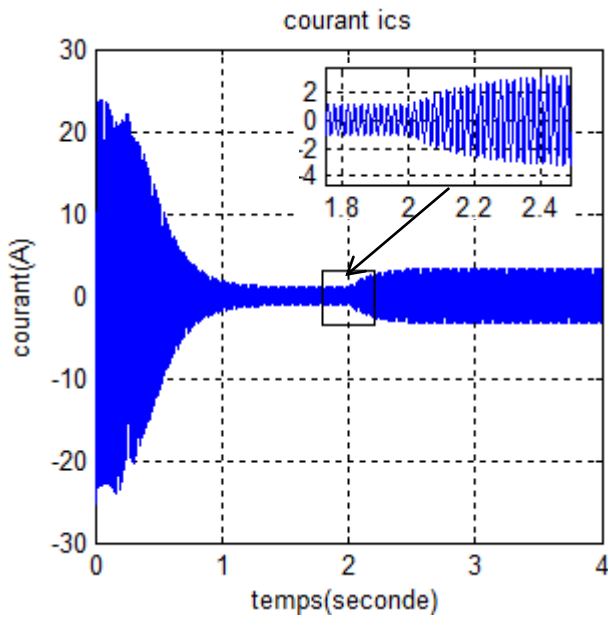


Figure. 2.12 Courant de la phase C

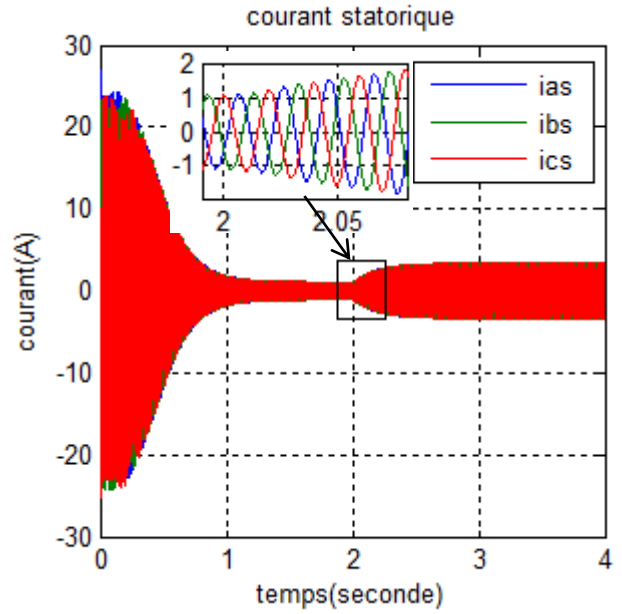


Figure. 2.13 Courants statoriques

➤ Le courant rotorique, le couple et la vitesse

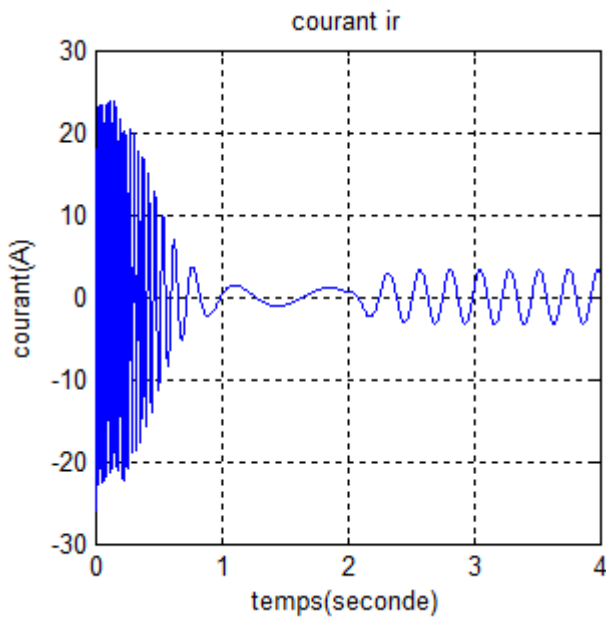


Figure. 2.14 Courant rotorique

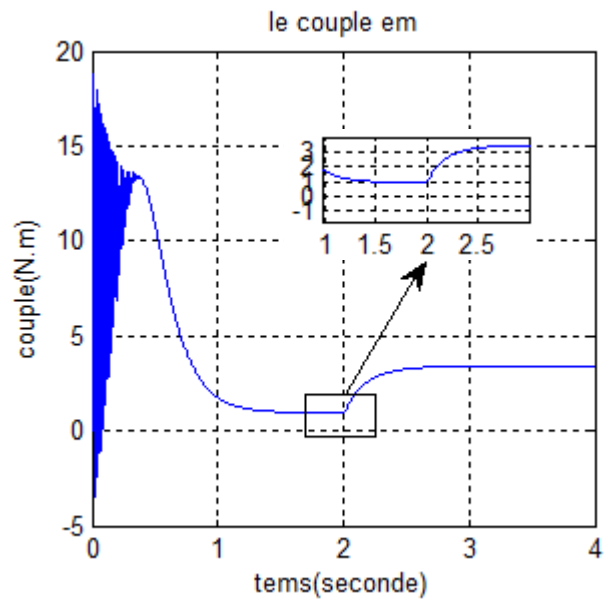
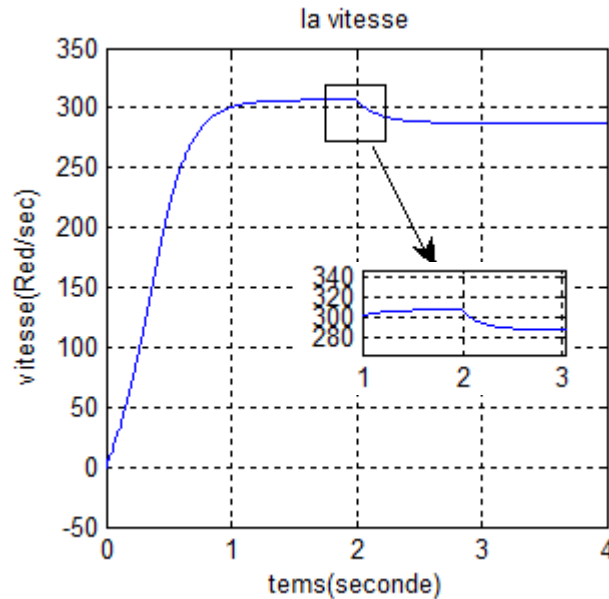


Figure. 2.15 le couple électromagnétique



**Figure. 2.16** la vitesse mécanique

Pour l'essai en charge, le démarrage avec une charge réduite de (0.5 N.m) (parmi les caractéristiques de la MAS). A l'instant  $t=2\text{sec}$  on applique un couple résistant de valeur  $C_r=3\text{ N.m}$  on observe que le couple électromagnétique rejoint sa valeur pour compenser cette sollicitation avec une réponse quasiment instantanée et pour les courants statoriques on constate une augmentation sur ces derniers et la vitesse subit une légère diminution, Une décroissance de la vitesse qui se traduit par un glissement.

### B. Présentation des résultats dans le régime anormale (court-circuit statorique):

❖ Essai à vide :

1. Temps de simulation  $t=4\text{sec}$ .
2. La charge est nulle ( $C_r = 0\text{ N.m}$ )
3. Application du défaut à l'instant  $t=3\text{sec}$ .

Lorsque l'essai du moteur défaillant à vide nous avons représenté résultats dans les figures suivant :

- ✓ Avec réduction de l'enroulement de la phase A du stator de 10%

➤ Les courants statorique

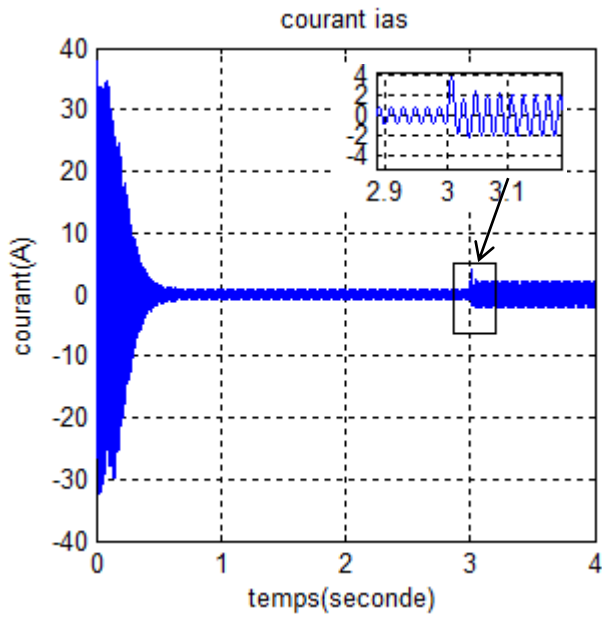


Figure. 2.17 Courant de la phase A

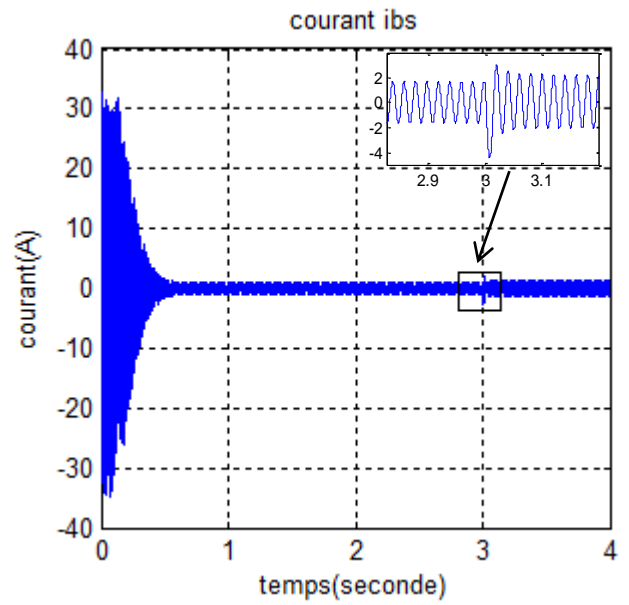


Figure. 2.18 Courant de la phase B

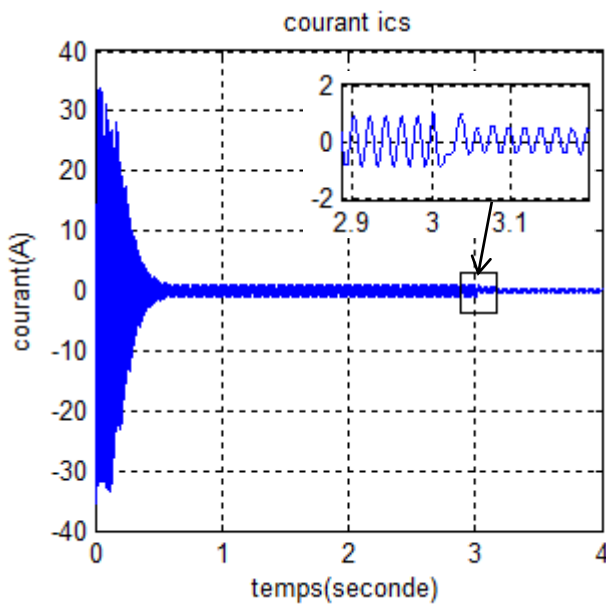


Figure. 2.19 Courant de la phase C

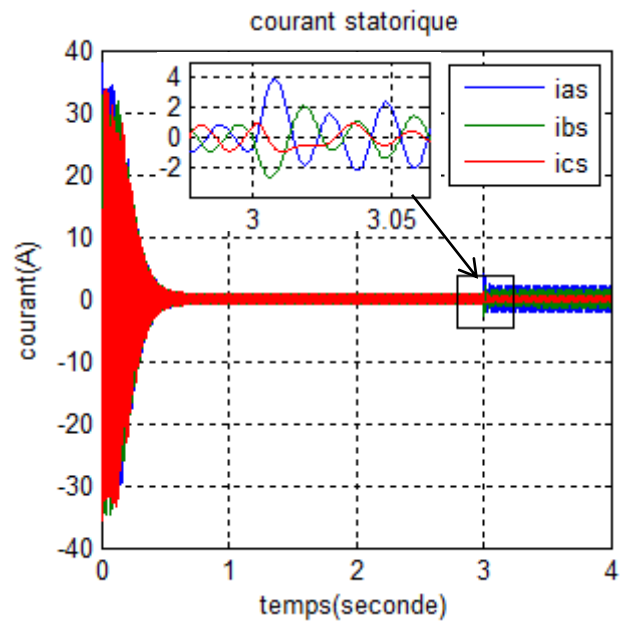


Figure. 2.20 Courants statoriques

➤ Le courant rotorique, le couple et la vitesse

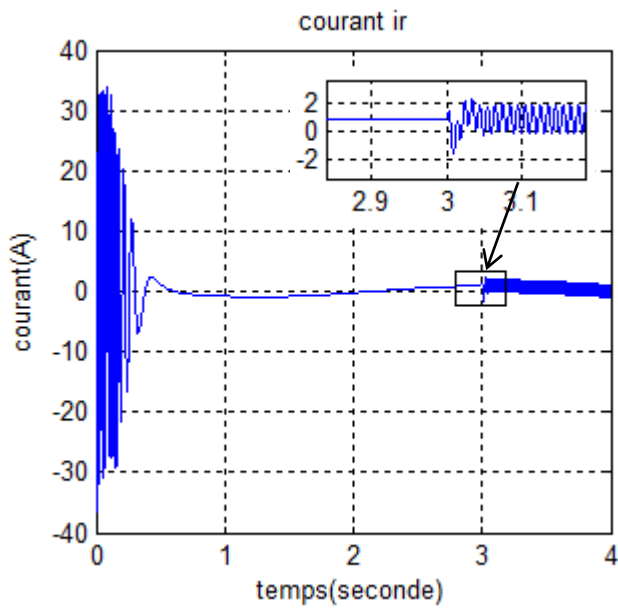


Figure. 2.21 courant rotorique

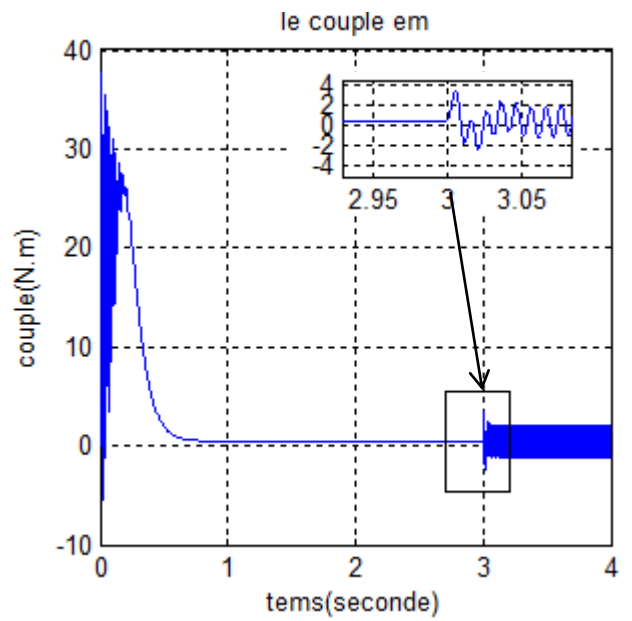


Figure. 2.22 le couple électromagnétique

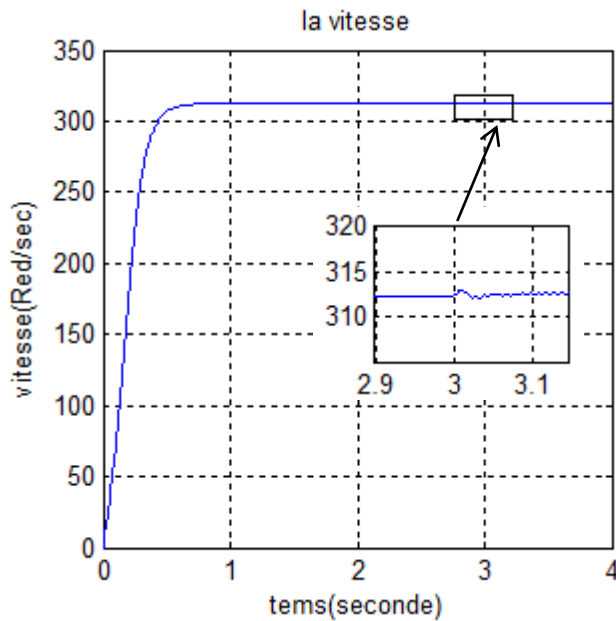
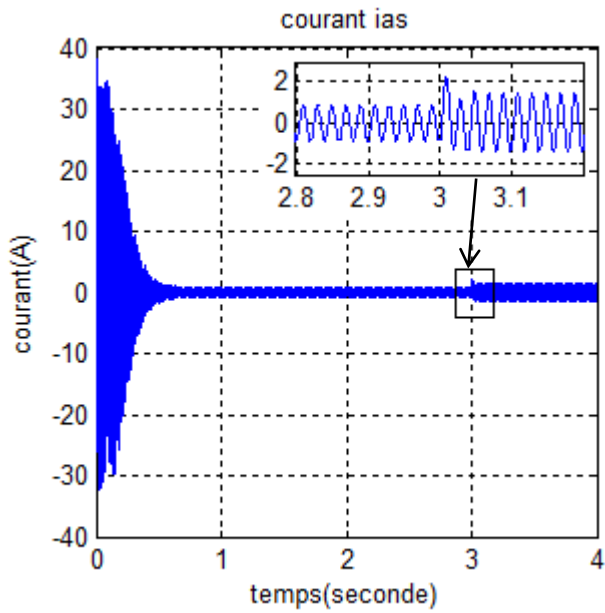


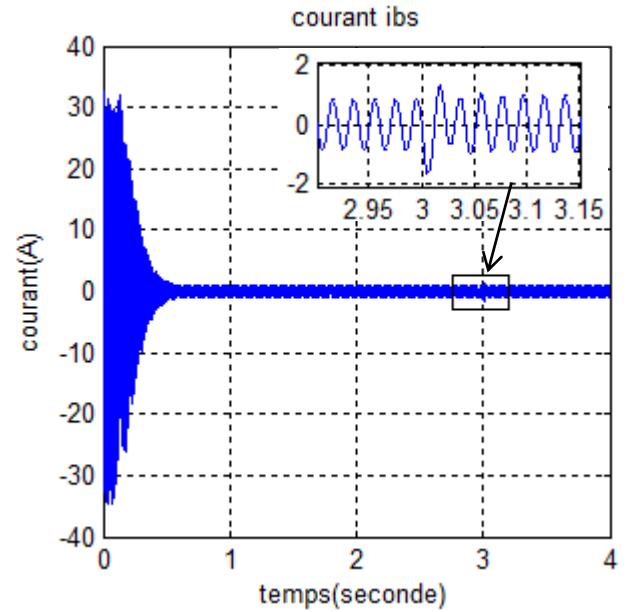
Figure.2.23 la vitesse mécanique

✓ Avec réduction de l'enroulement de la phase A du stator de 5%

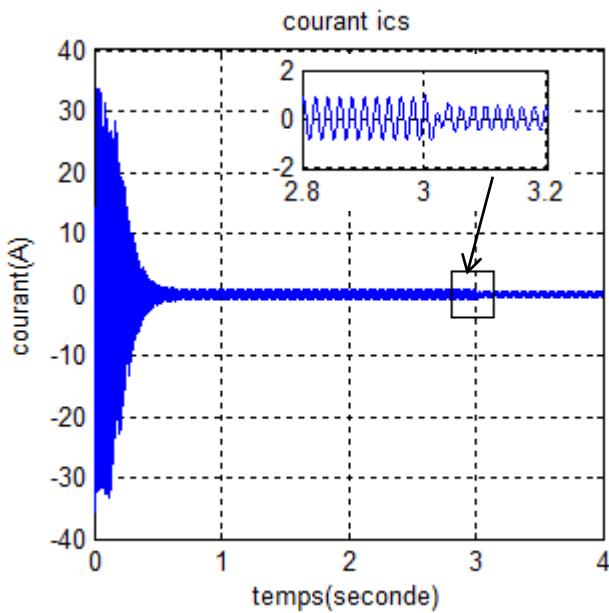
➤ Les courants statorique



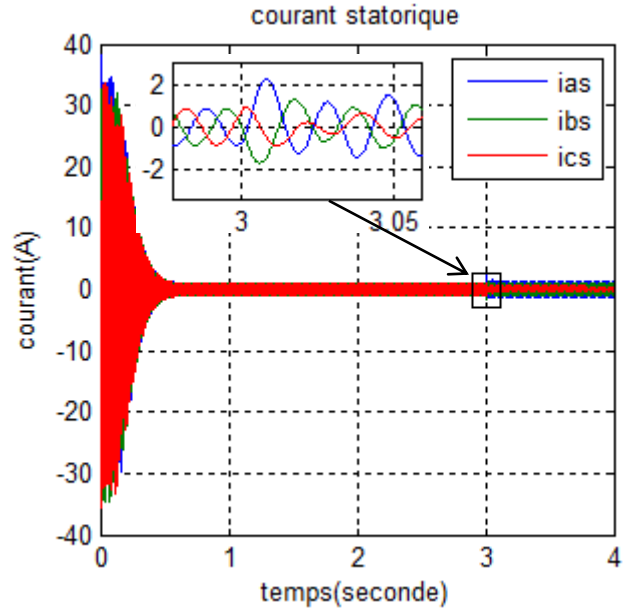
➤ **Figure. 2.24** Courant de la phase A



**Figure. 2.25** Courant de la phase B



**Figure. 2.26** Courant de la phase C



**Figure. 2.27** Courants statoriques

➤ Le courant rotorique, le couple et la vitesse

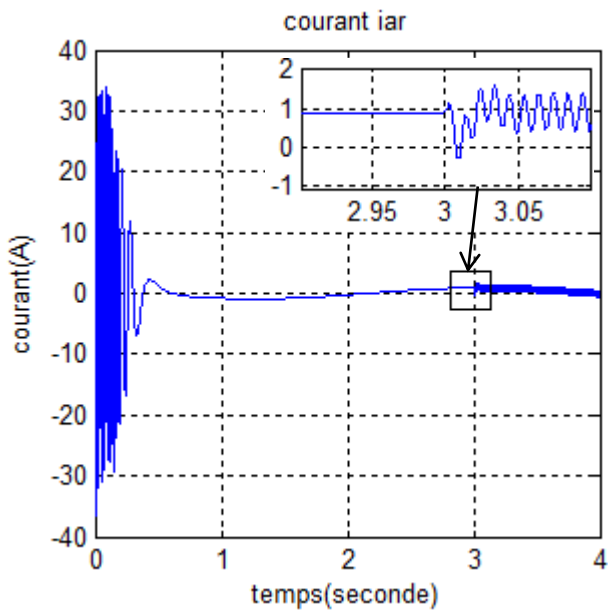


Figure. 2.28 courant rotorique

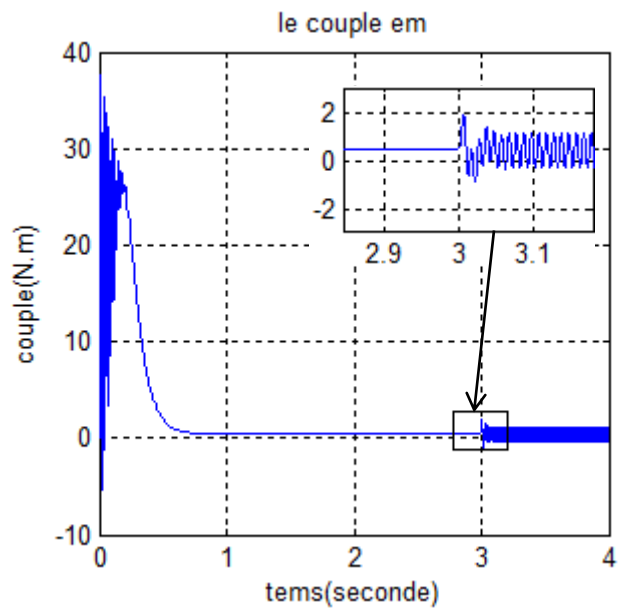


Figure. 2.29 le couple électromagnétique

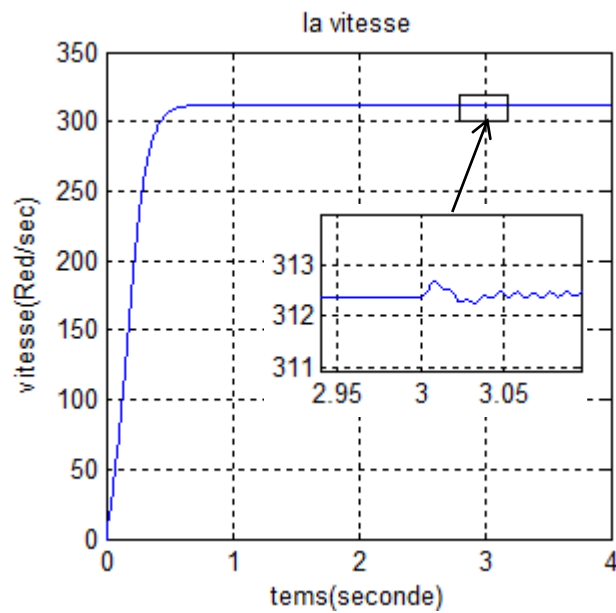


Figure. 2.30 la vitesse mécanique

❖ Essai en charge :

1. Temps de simulation  $t=4\text{sec}$ .
2. Application de la charge  $C_r = 3\text{N.m}$  à l'instant  $t=2\text{sec}$ .
3. Application du défaut à l'instant  $t=3\text{sec}$ .

Lorsque l'essai du moteur défaillant en charge nous avons représenté résultats dans les figures suivant :

- ✓ Avec la réduction de l'enroulement de la phase A du stator de 10%
- ✓ Les courants statorique

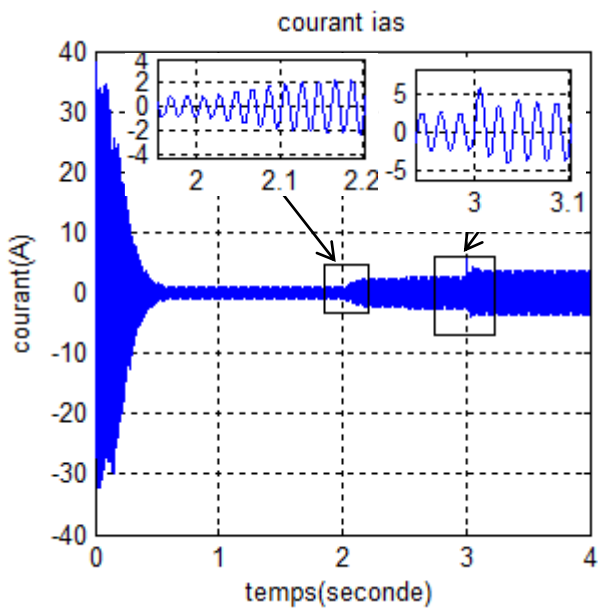


Figure. 2.31 Courant de la phase A

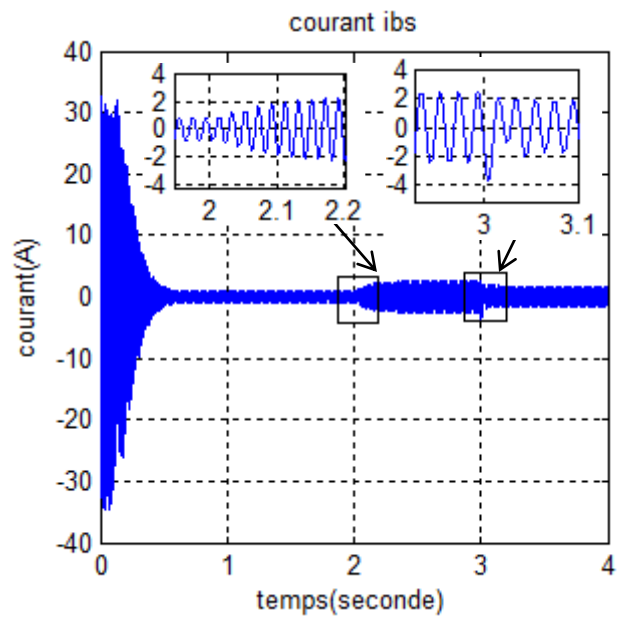


Figure. 2.32 Courant de la phase B



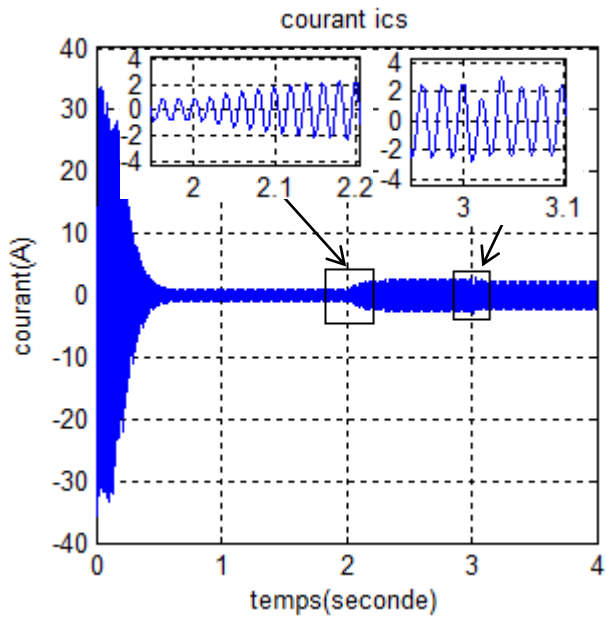


Figure. 2.33 Courant de la phase C

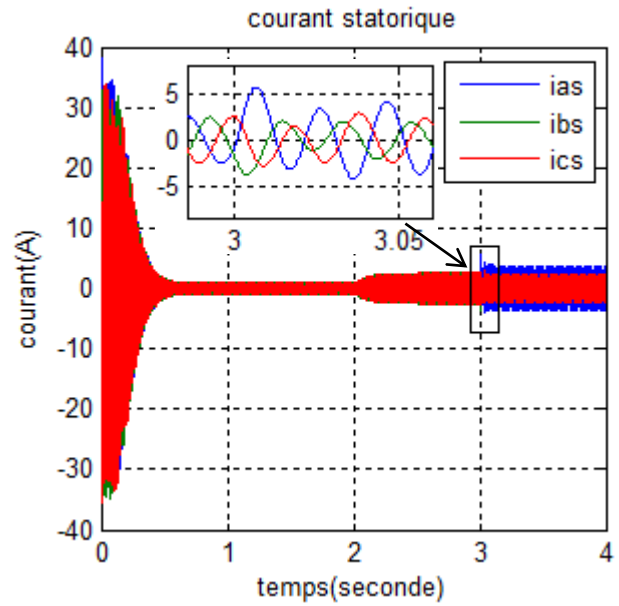


Figure. 2.34 Courants statoriques

➤ Le courant rotorique, le couple et la vitesse :

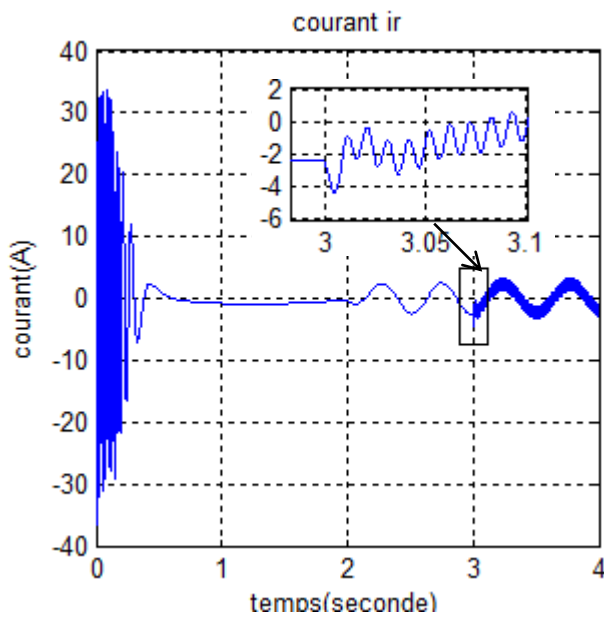


Figure. 2.35 courant rotorique

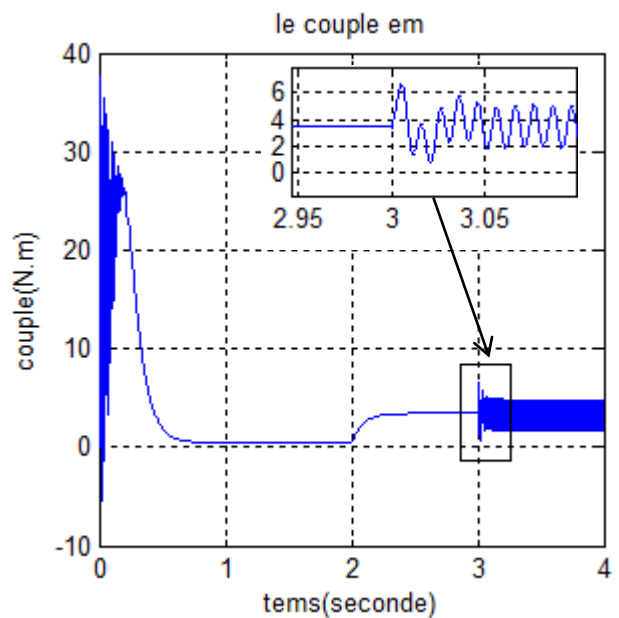


Figure.2.36 le couple électromagnétique

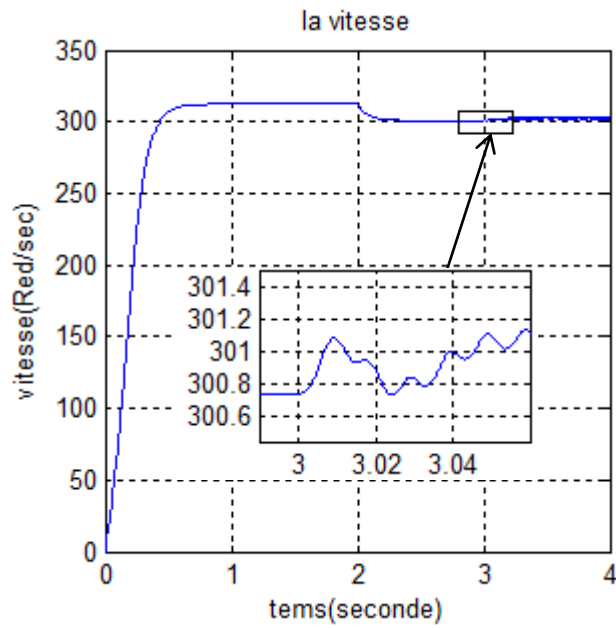


Figure.2.37 la vitesse mécanique

✓ Avec la réduction de l'enroulement de la phase A du stator de 5%

➤ Les courants statorique

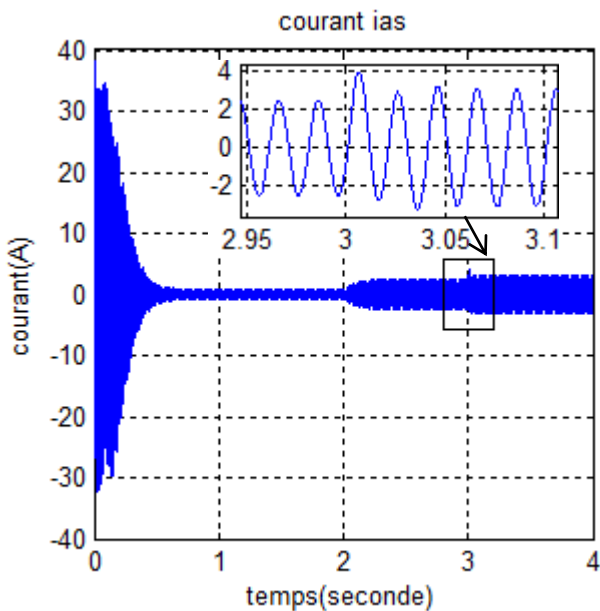


Figure. 2.38 Courant de la phase A

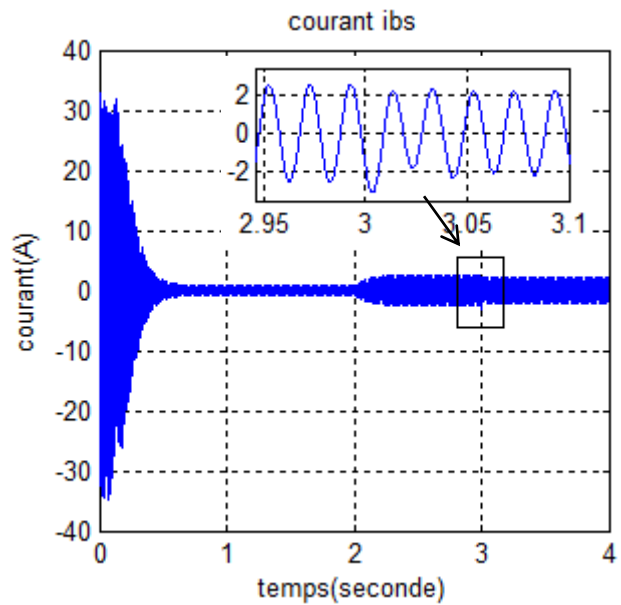


Figure. 2.39 Courant de la phase B

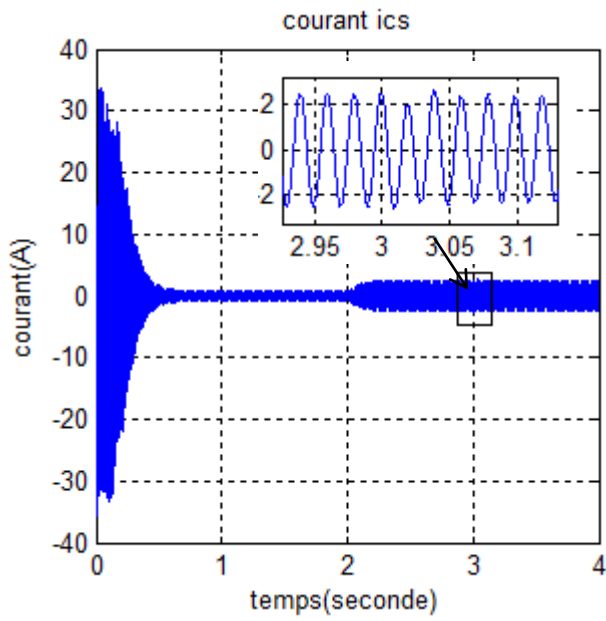


Figure. 2.40 Courant de la phase C

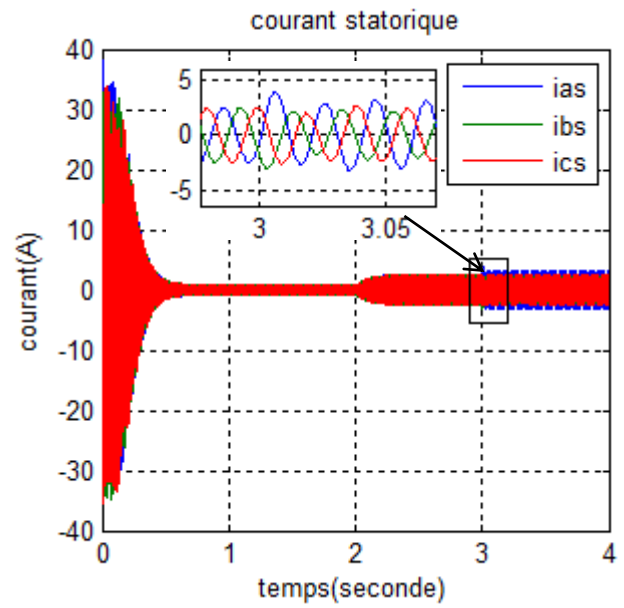


Figure. 2.41 Courant statorique

➤ Le courant rotorique, le couple et la vitesse :

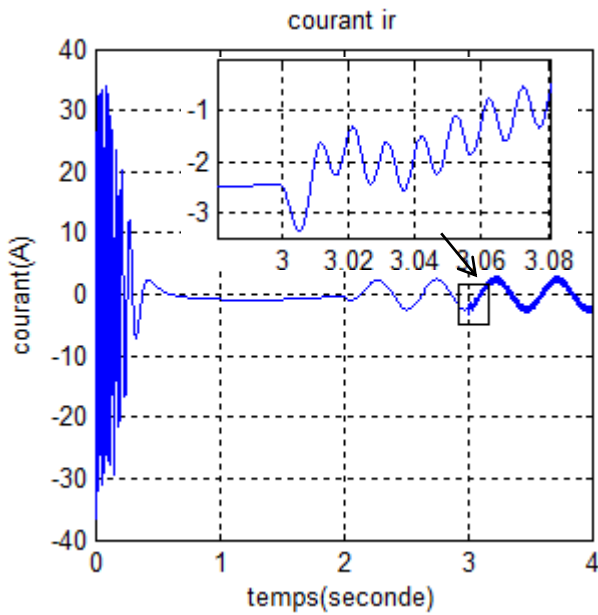


Figure. 2.42 courant rotorique

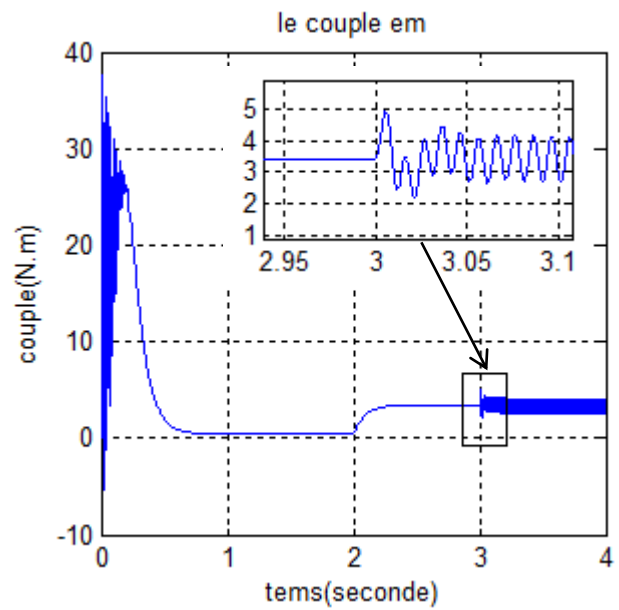
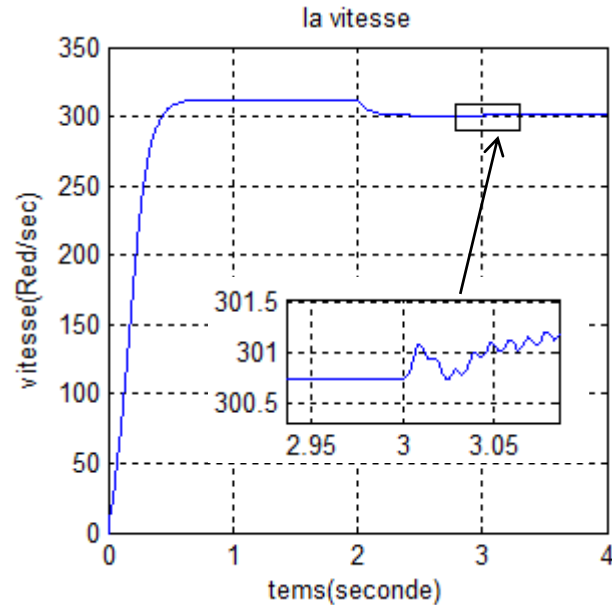


Figure. 2.43 le couple électromagnétique



**Figure. 2.44** la vitesse mécanique

Le courant rotorique, le couple et la vitesse : Dans les régimes anormaux, les grandeurs électriques sont caractérisées par rapport au régime normal par une variation brusque au moment d'apparition du défaut soit à vide ou bien en charge, dans notre cas le défaut est créé à l'instant 3 second.

On constate également que l'amplitude du courant dans la phase la plus infectée est plus grande que celles des autres phases (augmenté dans les phases A, B et diminué dans la phase C).

Le couple électromagnétique ainsi que la vitesse de la machine asynchrone en situation de défauts de court-circuit statoriques ont des valeurs sensiblement égales à celles en régime sain. Mais, on remarque que ces signaux sont bruités pendant l'apparition du défaut.

Lorsque des spires sont en court-circuit, l'inductance propre d'une phase statorique infectée change, et par conséquent les autres courants de phases changent à cause du couplage magnétique. Plus le nombre de spires en court-circuit est important, plus l'augmentation du courant est plus significative.

**2-5 Conclusion:**

Le but de ce chapitre était de présenter un système d'équations différentielles décrivant la machine asynchrone en présence de défauts statoriques, ce modèle dit triphasé a été présenté. Nous avons considéré le défaut statorique (court-circuit).

Cette modélisation nous a permis de simuler de manière précise plus proche de la pratique, le comportement de la machine en régime de défauts, elle demande un temps de calcul très important suite aux nombres d'équations différentielles qui représentent le modèle. Mais, elle permet de simuler la machine asynchrone en situation de défauts, ce qui n'était pas le cas quand on utilise la modélisation de modèle triphasé.

### 3.1 Introduction :

Les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle dans le traitement du signal, parmi elles, la plus anciennement étudiée est la transformation de Fourier (1822). Cette transformation permet d'explorer la composition fréquentielle du signal. Très tôt dans l'histoire du traitement du signal, il s'est avéré que la décomposition obtenue par Fourier n'était pas toujours la plus satisfaisante [22]. Aux années 1940, Gabor découvrait la première forme de la représentation temps-fréquence. Sa technique consiste à découper le signal en différentes plages de longueur fixe ou fenêtre. Chaque segment du signal limité par une fenêtre est étudié séparément des autres par l'analyse de Fourier. L'ensemble de ces transformées localisées forme la transformée de Gabor du signal. L'inconvénient majeur de ce procédé est que la longueur de la fenêtre étant fixée, il n'est pas possible d'analyser simultanément des phénomènes dont les échelles de temps sont différentes. Une autre technique d'analyse qui ne privilégie aucune échelle particulière mais qui généralise à toutes les échelles l'analyse locale des fréquences obtenues par la méthode de Gabor devient plus que nécessaire. En 1982, J. Morlet ouvre la voie conduisant à la solution en construisant l'analyse en ondelettes, fondée sur un concept quelque peu différent de celui de fréquence: le concept d'échelle. Cette procédure développée par Stéphane Mallat et systématisée par Ingrid Daubechies, porte le nom de multi-résolution et suggère une interprétation différente de l'analyse par ondelettes. Les ondelettes constituent donc un outil parmi les plus récents du traitement du signal et qui datent de quelques décennies seulement. Elles nous permettent d'effectuer une analyse robuste et mènent à de multiples applications. Contrairement à la transformée de Fourier à court terme, la transformée en ondelettes fait appel à la notion de temps-échelle impliquant des fenêtres d'analyse de longueurs dynamiques. [23]

### 3.2 De l'analyse de Fourier à l'analyse par ondelettes :

Pour expliquer ce qu'est le traitement et l'analyse du signal par ondelettes, nous allons faire une petite digression vers l'analyse de Fourier afin de mieux faire comprendre d'où émerge ce concept.

Lorsqu'on observe un signal  $f(t)$  au cours du temps, on est en mesure de connaître son début et sa fin et de constater ses éventuelles variations qualitativement. Cependant, il est moins évident de se faire une idée de ses périodicités (ses fréquences).

D'où l'utilisation de la transformée de Fourier afin de décomposer le signal en une fréquence fondamentale accompagné de ses harmoniques (les spectres). Chaque fréquence correspond à une fonction sinusoïdale. [08] Donc l'analyse de Fourier est une analyse en fréquence d'un signal temporelle  $f(t)$ .

La figure 3.1 explique le concept de la transformée de Fourier

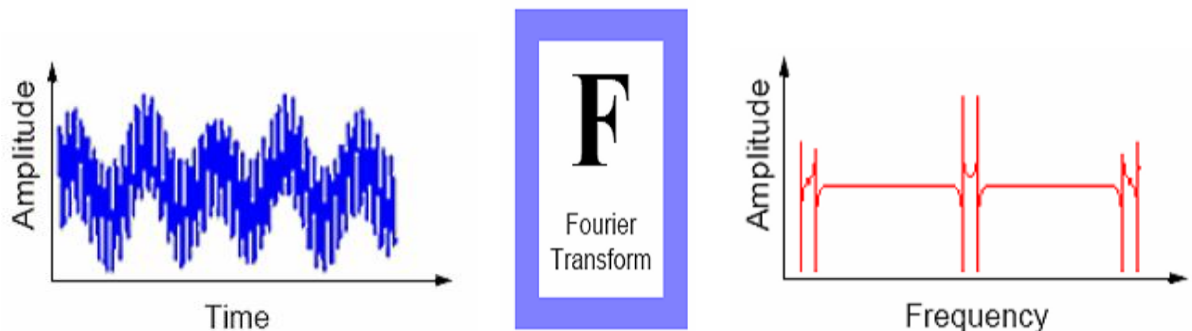


Figure 3.1 Représentation temporelle vers fréquentielle. [10]

Si la fonction  $f$  est périodique de période  $T$ , sa transformée de Fourier est :

$$C_n(f) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-2i\pi \frac{n}{T} t} dt \tag{3.1}$$

Ou, si  $f$  appartient à  $L^1(\mathbb{R})$ :

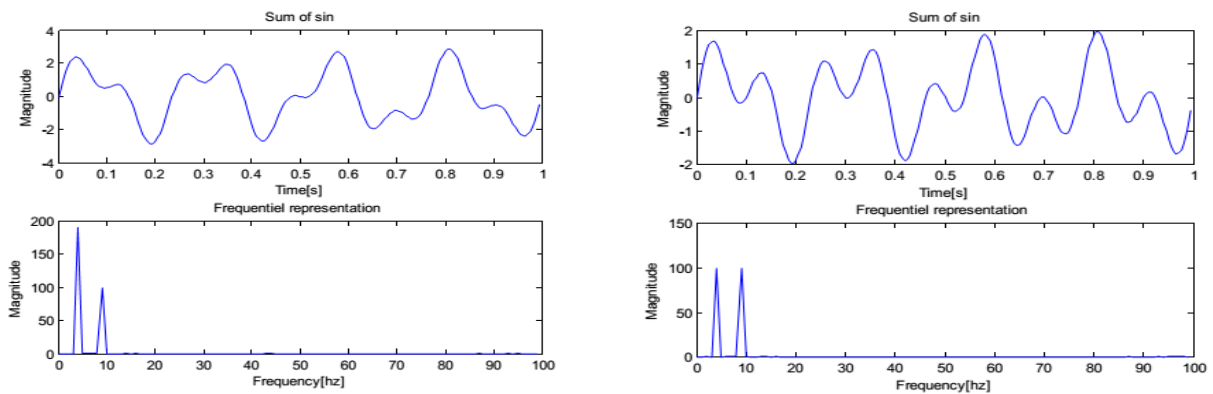
$$\hat{f}(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2i\pi V t} dt \tag{3.2}$$

$\hat{f}(V)$  Donne le contenu fréquentiel de  $f$  pour la fréquence  $\frac{n}{T}$  ou  $V$ .

### 3.2.1 Exemple d'application de la transformée de Fourier FT :

#### a- Signal stationnaire:

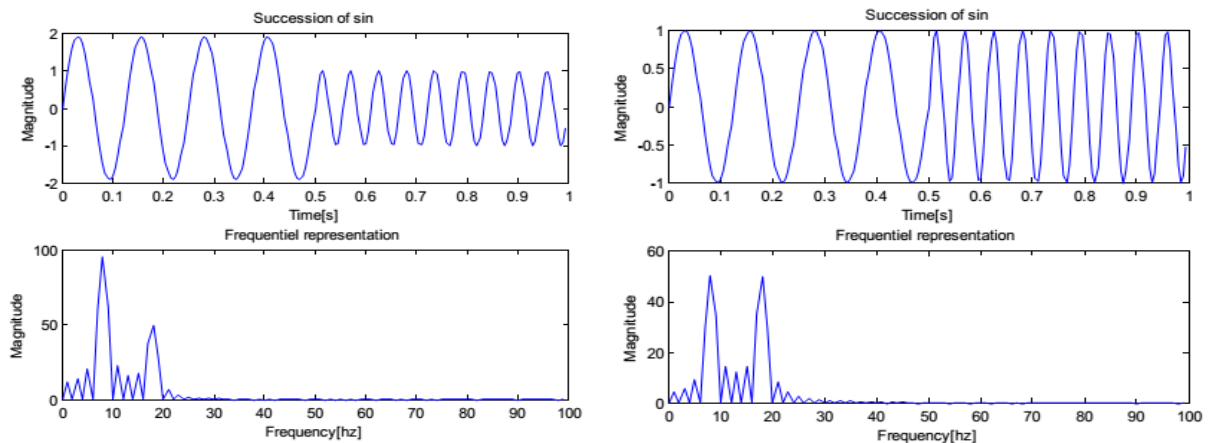
Dans notre exemple schématisé par la figure 3.2 on a appliqué la transformée de Fourier d'un signal stationnaire composé d'une somme de deux sinusoïdes de différents fréquences et de différents amplitudes (partie gauche) et le même signal de même amplitude (partie droite).



**Figure 3.2.** Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoides  $F_1 = X_1 + X_2$  .[07]

**b -Signal non stationnaire:**

Dans le deuxième exemple on passe à un signal non stationnaire (succession de deux sinusoides) de différente amplitude (à gauche) et de même amplitude (à droite).



**Figure. 3.3** Représentation temporelle et fréquentielle 'succession de deux sinusoides

$$F_1 = X_1 \oplus X_2 \text{ .[07]}$$

D'après les deux exemples précédents, on remarque que la transformée de Fourier nous donne une bonne connaissance combien de fréquences existe mais sans aucune information où ses fréquences sont localisés dans le temps. Donc l'analyse est globale, d'où la difficulté d'obtenir une information localisée dans le temps. Donc on ne peut pas étudier des signaux dont la fréquence varie au cours du temps. (Les signaux non stationnaires). L'idée suivante consiste à représenter notre signal en fonction du temps et de fréquence. On a donc une

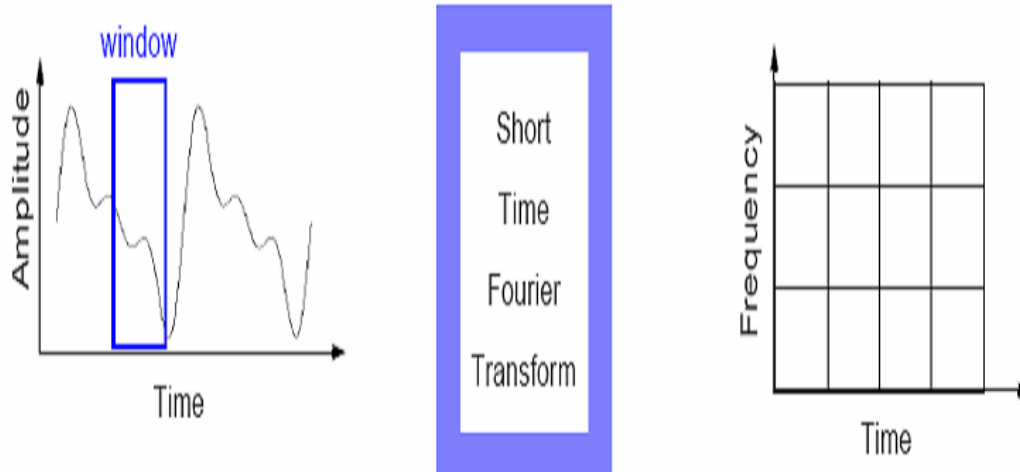


description directe et une description fréquentielle. On passe alors à la transformée de Fourier à fenêtre glissante (Short Time Fourier Transform) STFT.

### 3.2.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante STFT :

Pour réaliser une analyse spectrale locale d'un signal  $f(t)$  autour d'un instant arbitraire  $t_0$ , il faudrait calculer une transformée de Fourier (TF) du voisinage immédiat de ce point l'intégrale de Fourier nécessitant un temps d'intégration infini, cela suppose que l'aspect local soit introduit on n'observant le signal que dans un certain intervalle  $T$  proche de  $t_0$ , dans lequel on le considère comme stationnaire. Les fonctions sinusoïdales qui servent à décomposer le signal dépendent à la fois du temps et de la fréquence. L'un des premiers à avoir appliqué ce principe aux transformées de Fourier est le physicien Dennis Gabor en 1940. On parle alors de transformées de Fourier à fenêtre glissante. [09]

L'idée de base consiste à découper le signal en plages temporelles finies. On réalise sur chaque plage, une analyse de Fourier. Cette analyse est donc dépendante de la localisation de la plage, la figure 3.4 donne un aperçu sur ce concept. [07]



**Figure 3.4** Représentation temporelle vers STFT. [10]

### 3.2.2.1. Exemple d'application de la transformée de Fourier à fenêtre glissante STFT :

On peut donner l'algorithme de la transformée de Fourier à fenêtre glissante comme suit :

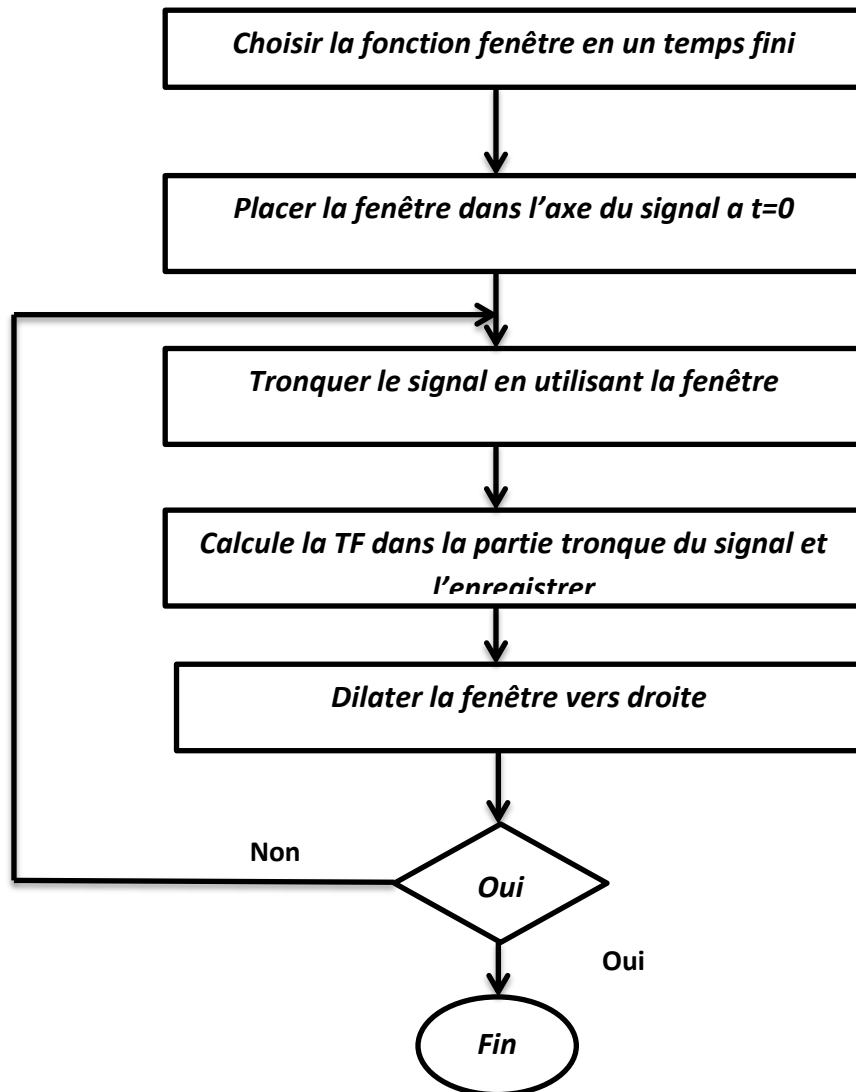


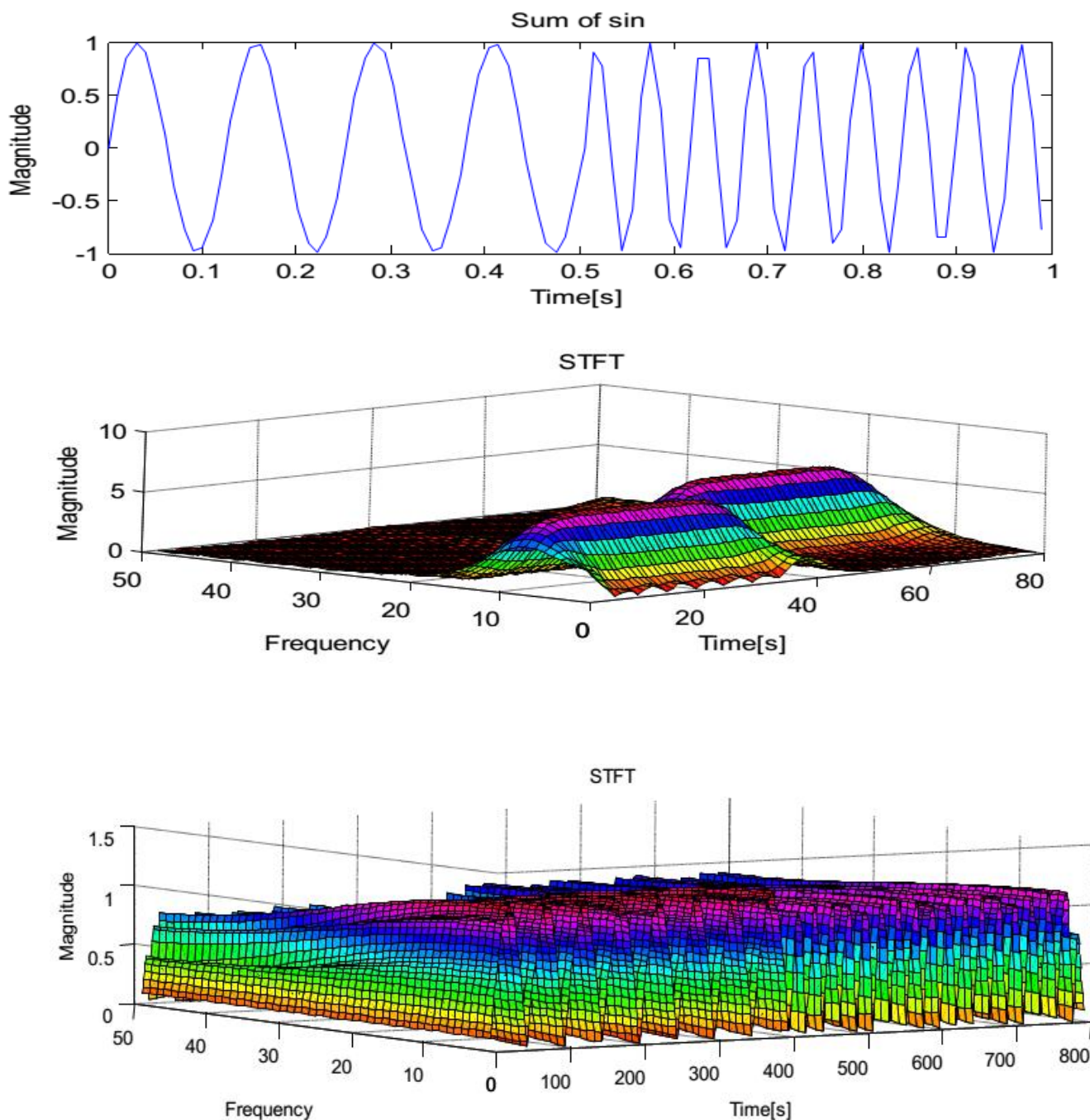
Figure3.5 Algorithme de STFT. [07]-[11]

La multiplication du signal  $f(t)$  par une fenêtre glissante  $h(t - t_0)$  et le calcul de la transformée de Fourier de ce produit est donné par la relation mathématique suivante:

$$G_f(V, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) h(t - t_0) e^{-2i\pi Vt} dt \quad (3.3)$$

Où,  $t_0$  est le temps,  $V$  est la fréquence.

Dorénavant, chaque TF fournit les renseignements spectraux d'une tranche de temps séparée du signal, en fournissant l'information temporelle et fréquentielle simultanément l'exemple suivant schématisé dans la Figure 3.6 donne la STFT du signal non stationnaire précédent pour différentes tailles de fenêtre.



**Figure 3.6** Représentation temporelle et leur STFT avec taille de fenêtre (a) 0.05 et (b) 0.005 'Succession de deux sinusoïdes'. [07]

Le principal inconvénient de cette technique est que la longueur de la plage (l'échelle) est fixe. Cela peut s'avérer très embarrassant si on fait l'analyse de signaux qui correspondent à des phénomènes avec des échelles de temps très différents. [24]

**3.2.2.2 Limitations de la TF à fenêtre glissante :**

❖ **Principe d'incertitude :**

La localisation d'un signal en temps et en fréquence ne peut se faire sur des supports infiniment réduits. En particulier, plus on accroît la précision en fréquence de l'analyse, plus on perd la localisation temporelle, et donc de précision en temps, et réciproquement. Il existe une relation de principe d'incertitude, vient de la mécanique quantique, mais il joue un très grand rôle dans le traitement du signal. Il stipule que l'on ne peut localiser aussi précisément que l'on veut en temps et en fréquence un signal. Mathématiquement on écrit que la moyenne des fluctuations en temps et en fréquence est bornée inférieurement :

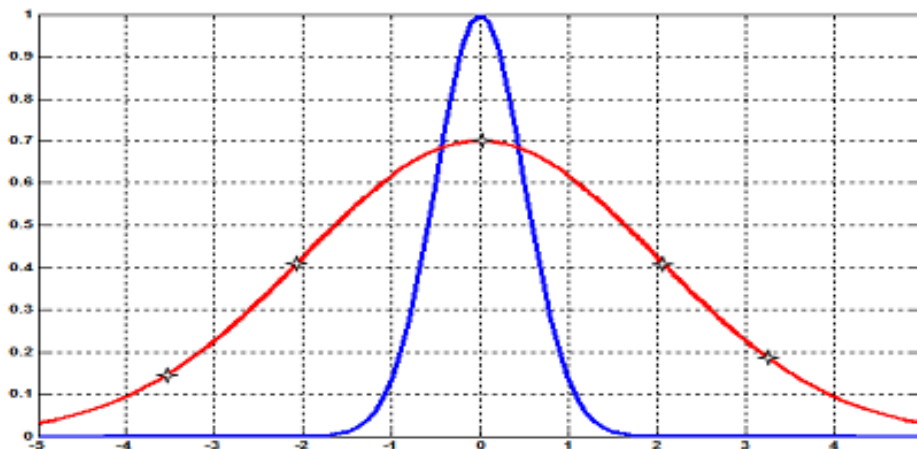
$$\sigma_t \cdot \sigma_v \geq 1/4\pi \tag{3.4}$$

Avec:

$\sigma_t$  la résolution temporelle

$\sigma_v$  la résolution fréquentielle

On peut illustrer cette formule par une fonction particulière appelée gaussienne et qui a la particularité que sa transformée de Fourier est encore une gaussienne [24]



**Figure 3.7** Exemple explicatif du principe d'Heisenberg. [12]

D'après la figure 3.7, le signal avec symbole étoile \* est la gaussienne d'origine, l'autre sa transformée de Fourier. La différence entre les deux largeurs montre bien le principe: «Au plus on localise en temps, au moins on localise en fréquence ».On peut montrer que la gaussienne à la particularité que:

$$\sigma_t \cdot \sigma_v = 1/4\pi$$

Donc les deux résolutions temporelle et fréquentielle ne peuvent pas être arbitrairement grande .On ne peut pas connaître précisément à quel instant dans le temps le spectre fréquentielle est localisé. On peut seulement connaître dans quel intervalle de temps l'intervalle des fréquences sont présentée. [13]

L'analyse en ondelettes a pour objectif de rendre compte de ces deux phénomènes simultanément, en introduisant une fenêtre dont la taille varie avec la fréquence.

### 3.3 Transformée en ondelettes :

#### 3.3.1 Définition :

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  $\psi(t)$  unique par une translation en temps et une dilatation. Partant d'une fonction bien localisée, dans le plan temps-échelle. [14]

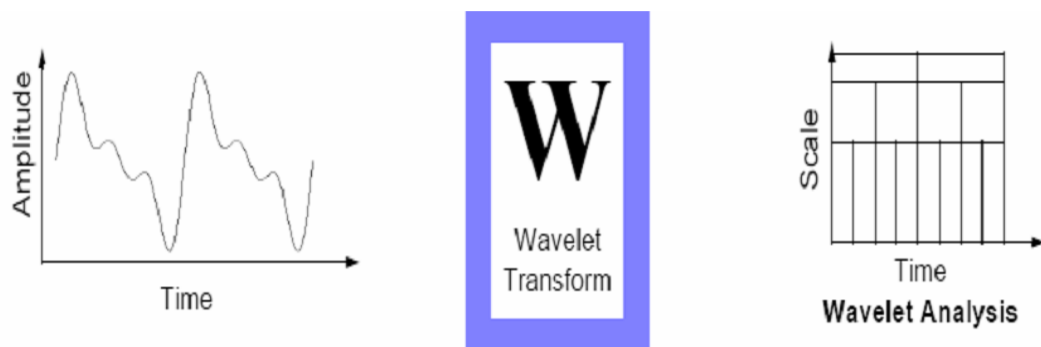


Figure 3.8 Représentation temporelle vers ondelettes. [15]

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

❖ Exemple de l'ondelette de Morlet (Complexe) :

Soit la formule mathématique de l'ondelette Morlet suivante :

$$\psi(X) = e^{-\pi X^2} e^{10i\pi X} \tag{3.5}$$

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

$$\psi_{u,s}(X) = \frac{1}{\sqrt{s}} e^{-\pi\left(\frac{X-u}{u}\right)^2} e^{-10\pi\left(\frac{X-u}{s}\right)} \tag{3.6}$$

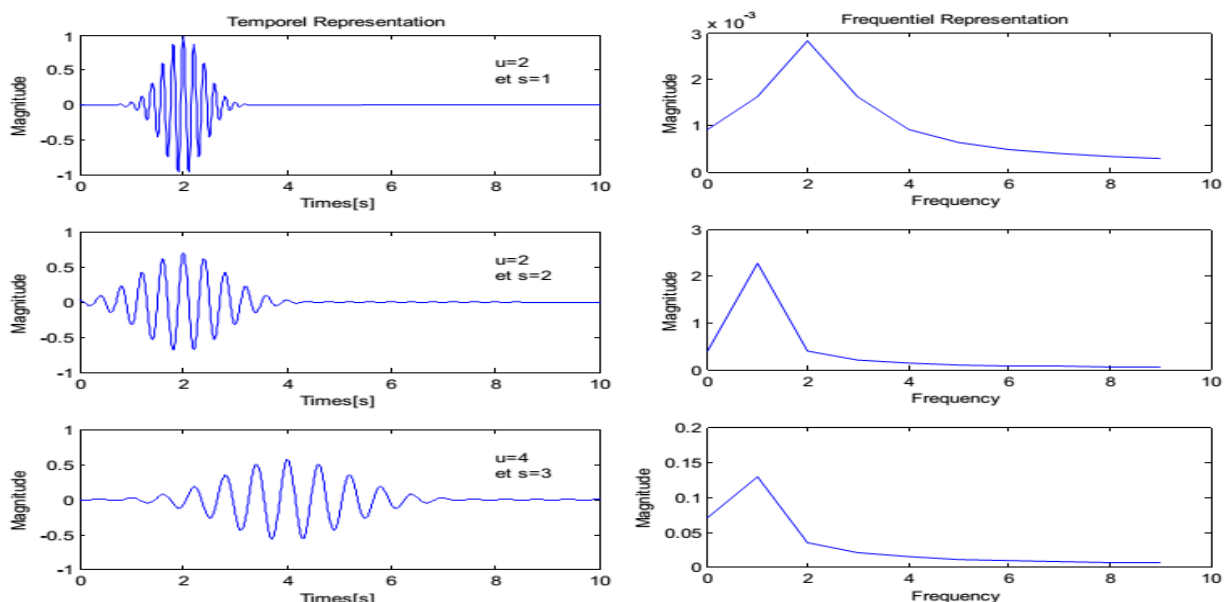


Figure 3.9 : Evolution de la forme d'une ondelette et de sa transformée

De Fourier (à droite). [07]

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

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi * \left( \frac{t-u}{s} \right) dt \quad (3.7)$$

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

$$C_{\psi} = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (3.8)$$

C'est une représentation complète, stable et redondante du signal; en particulier, la transformée en ondelettes est inversible à gauche. La redondance se traduit par l'existence d'un noyau reproduisant. Comme la transformée de Fourier à fenêtre, une transformée en ondelettes peut mesurer les variations de temps-fréquence des composants spectraux, mais il a une différente résolution de temps-fréquence. Une transformée en ondelettes fait corrélérer  $f$  avec  $\psi_{u,s}(t)$  on appliquant la formule de Fourier-Parseval sur l'équation (3.7), on obtient cette dernière écrite comme intégration de fréquence:

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_{u,s} * (t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \hat{\psi}_{u,s}(\omega) dt \quad (3.9)$$

Le coefficient d'ondelettes  $Wf(u, s)$  dépend ainsi des valeurs  $f(t)$  et  $\hat{f}(t)$  dans le domaine temps-fréquence où l'énergie de  $\psi_{u,s}(t)$  et de  $\hat{\psi}_{u,s}(t)$  est concentrée. Des harmoniques variables dans le temps sont détectés à partir de la position et l'échelle des coefficients d'amplitude élevés des ondelettes. En temps,  $\psi_{u,s}(t)$  est centrée à  $u$  avec une distribution proportionnelle au  $s$  que sa transformée de Fourier est calculée à partir de la relation suivante:

$$\hat{\psi}_{u,s}(\omega) = e^{-ju\omega} \sqrt{s} \hat{\psi}(s\omega) \quad (3.10)$$

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

La diffusion de temps et de fréquence est respectivement proportionnelle à  $s$  et à  $1/s$  Quand  $s$  change, la longueur et la largeur du rectangle changent mais sa surface reste toujours constante, comme illustré par la Figure 3.10.

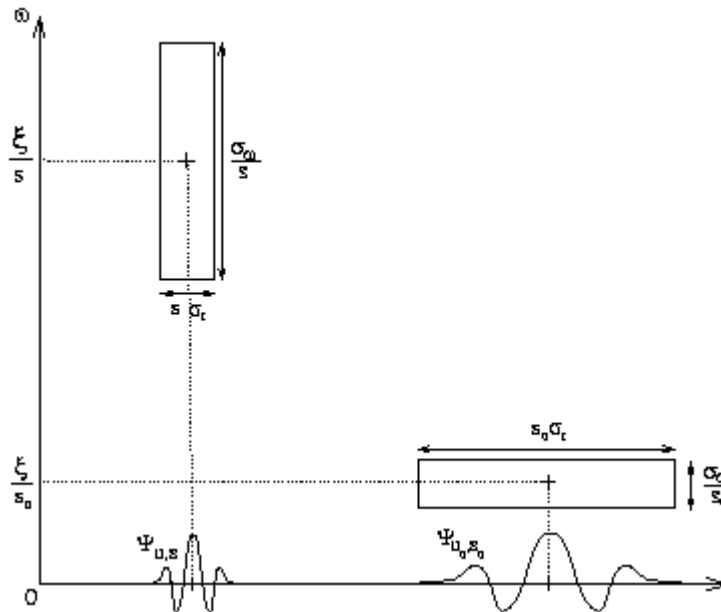


Figure 3.10 : Boîtes Temps- fréquence des deux ondelettes  $\psi_{u,s}$  et  $\psi_{u_0,s_0}$

Quand l'échelle  $s$  diminue, le support du temps est réduite mais la diffusion de fréquence augmente et couvre un intervalle qui est décalé vers des hautes fréquences. [12]

### 3.3.2 Transformée en ondelettes continue (TOC)

On lui associe la famille d'ondelettes  $\psi_{u,s}(t)$  générées par des translations et des dilatations de  $\psi(t)$ . cette dernière sont dilatées avec un paramètre d'échelle  $s$ , et translatée par  $u$  :

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \tag{3.11}$$

L'ondelette  $\psi(t)$ . est une fonction de moyenne nulle:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \tag{3.12}$$

Parmi une grande famille des ondelettes, on trouve: Ondelette gaussienne et gaussienne complexe, Morlet et Morlet complexe, chapeau mexicain, Haar, Daubechies, Meyer et Meyer avec une fonction auxiliaire et Ondelette complexe de Shannon...etc.



La figure 3. 11 suivantes donnent Quelques formes des ondelettes usuelles

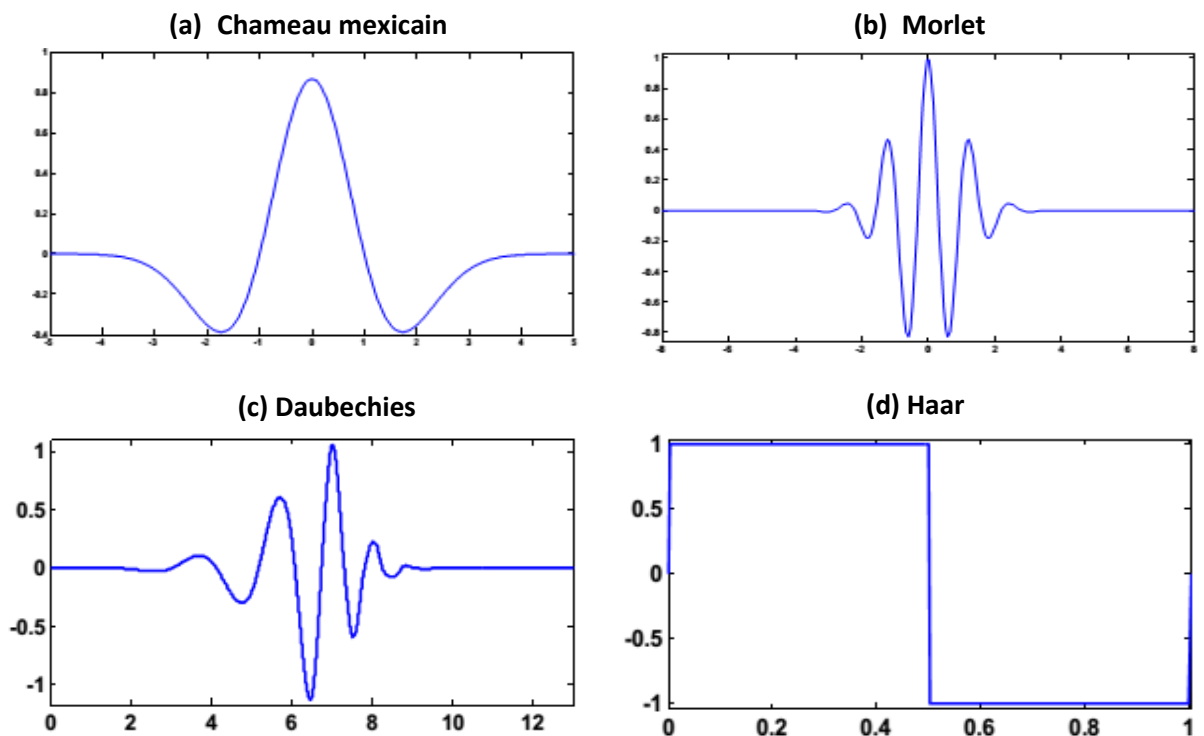


Figure 3.11 Quelques formes des ondelettes usuelles. [12]

Les ondelettes sont de forme constante mais de taille variable, proportionnelle au paramètre de dilatation  $s$  (variable d'échelle). La transformation en ondelettes est aussi interprétée comme étant un processus de filtrage du signal analysé par un filtre passe-bande de bande passante variable ; c'est le paramètre  $s$  qui fixe la valeur de cette bande. A. Grossmann et J.Morlet ont démontré que si  $\psi(t)$  est à valeurs réelles, l'ensemble de ces ondelettes peut être considéré comme étant une base orthonormée. Cela signifie que tout signal d'énergie peut s'écrire comme une combinaison linéaire d'ondelettes  $\psi_{u,s}(t)$  et que les coefficients de cette combinaison d'ondelettes sont les produits scalaires  $\int f(t) \psi_{u,s}(t) dt$ ,  $f(t)$  étant le signal étudié. Ces produits scalaires mesurent, en un certain sens, les fluctuations du signal  $f(t)$  autour du point  $u$  à l'échelle  $s$ .

La transformée continue par ondelette est définie donc par le calcul des coefficients:

$$C(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \tag{3.13}$$

Le paramètre  $s$  est un facteur d'échelle, inversement proportionnel à la fréquence.

La représentation temps-échelle n'est pas une limitation de la transformation en ondelettes, mais elle est une autre manière d'aborder l'analyse du signal par un regroupement d'information fréquentielle et temporelle. Il est à noter que la durée de l'ondelette est directement proportionnelle au paramètre d'échelles. Dans sa formulation, la transformée en ondelettes peut s'interpréter comme une analyse à banc de filtres à surtension (passe-bande) constante. Dans un tel banc, chacun des filtres (passe-bande) peut se déduire d'un gabarit unique par une dilatation ou compression en fréquence.

### 3.3.3 Application de la transformée d'ondelette continue:

❖ En utilisant notre code MATLAB:

Dans cette partie en va utiliser comme exemple un signal bruit chargé à partir de Matlab la figure suivante donne deux cas déférents de la transformée d'ondelettes continues correspond aux changements d'échelles

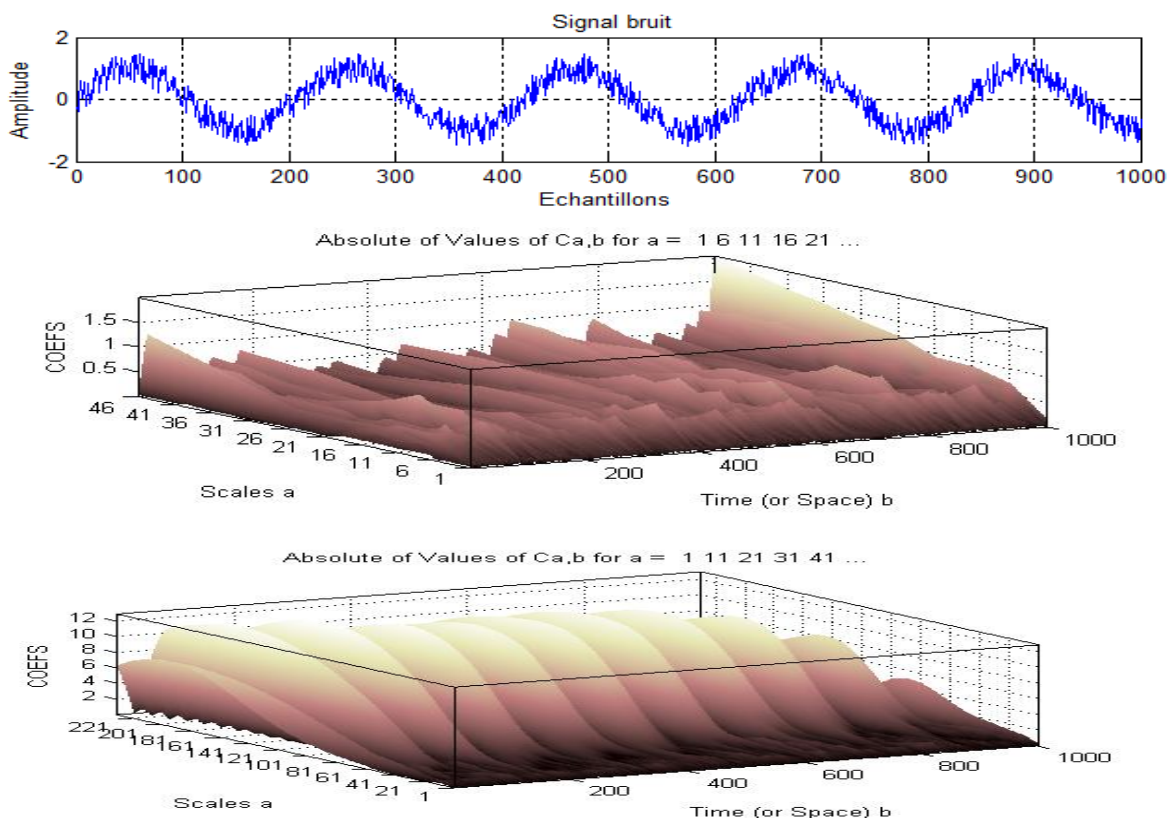


Figure 3.12 Signal bruit et sa transformée d'ondelettes continue

Le but de cette figure est de mettre en évidence les propriétés de la transformée d'ondelettes, lorsqu'on augmente la plage d'échelle, La TOC met en clair les périodicités du notre signal bruit.

### 3.3.4 Transformée en ondelettes discrète (TOD)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence que la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisées. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes ayant un facteur d'échelle  $u = 2^i$ .

La transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, DSPACE, CARTE à uP...). [16]

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  $s$  et de la dilatation  $u$  (Toutes les valeurs sont possibles).

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière. Soit  $\varphi$  la fonction échelle. Elle doit être dans  $R^2$  et ayant une moyenne non nulle.

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

$$\varphi_{i,j} = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i}k - j) \quad (3.14)$$

Et de la même manière la base d'ondelette :

$$\psi_{i,j} = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i}k - j) \quad (3.15)$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

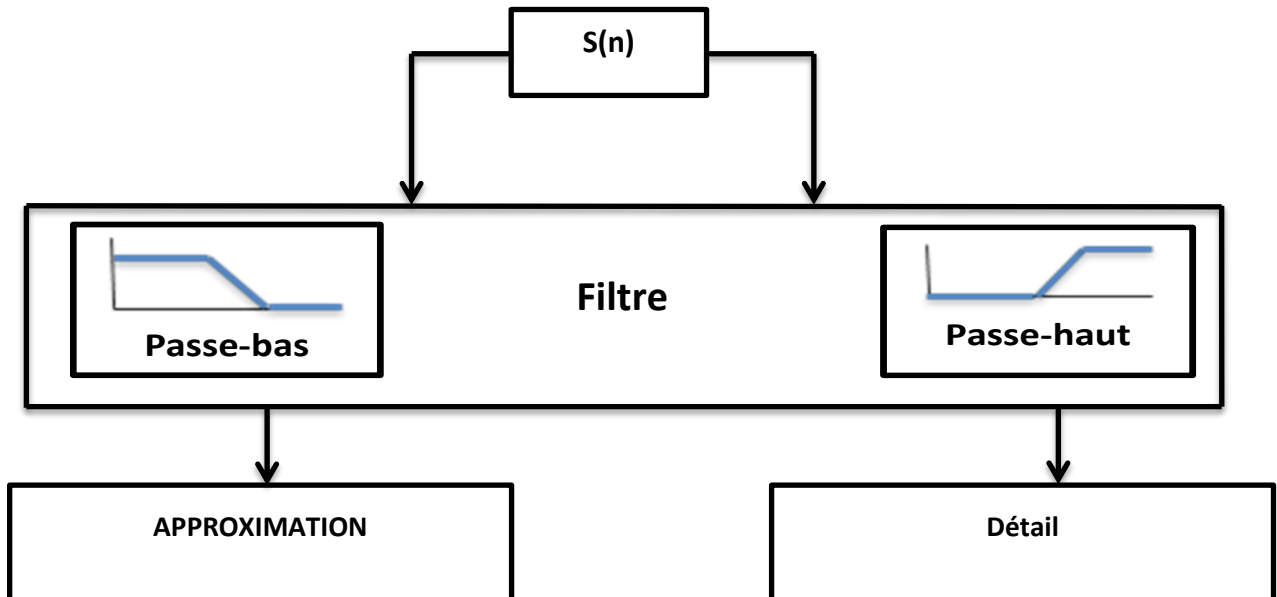
$$\varphi(k) = \sum_j 2 h(j) \varphi(2k - j) \quad (3.16)$$

$$\psi(k) = \sum_j 2 g(j) \varphi(2k - j) \quad (3.17)$$

Les équations (3.16) et (3.17) représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la résolution haute directement.

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

La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine  $s(n)$ , traverse deux filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas, et émerge en tant que deux signaux. Respectivement le signal d'approximations A et le signal de détails comme le montre la figure 3.13



**Figure3.13** Décomposition du signal  $s(n)$ , en approximations et détails. [15]

Pour plusieurs signaux, la partie dans les basses fréquences est la partie la plus importante. Elle donne au signal son identité.

La partie haute fréquence, attribuer saveur (fumet) ou nuance.

Dans l'analyse d'ondelette, on parle seulement des approximations et détails.

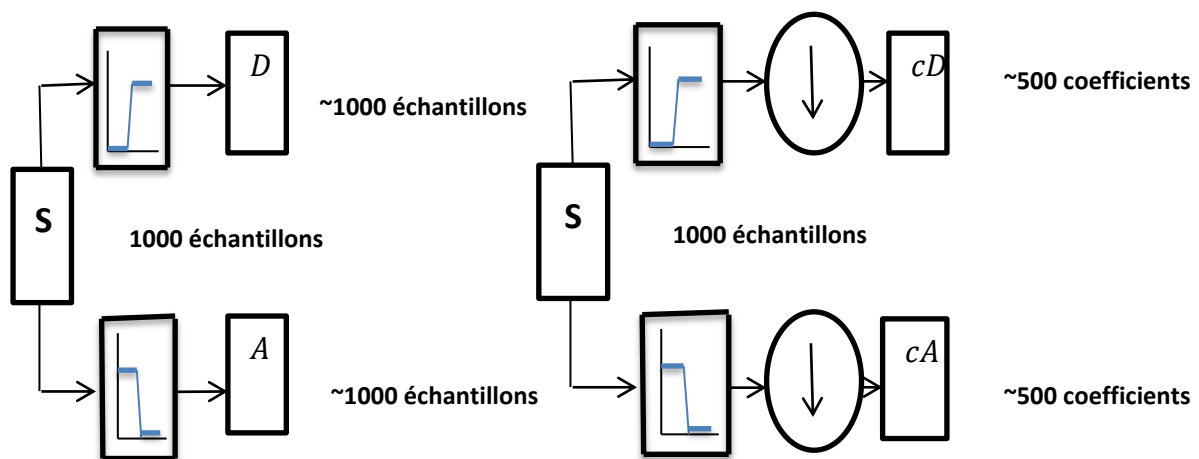
- L'approximation : est la partie grand échelle donc basse-fréquence du signal.
- Le détail : est la partie petit-échelle donc haute-fréquence du signal.

**3.3.4.1. Décomposition simple:**

Comme il a été noté précédemment le signal  $s(n)$ , 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.

Supposons, pour l’instant, que le signal original  $s(n)$  contient 1000 échantillons. Le résultat des deux signaux à 1000 échantillons pour chaque signal, le total est 2000 échantillons.

Pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients approximation) et CD (Coefficients détails). Tous deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d’origine. Ceci est dû au fait de l’opération de décimation par 2 (down sampling) .[15]

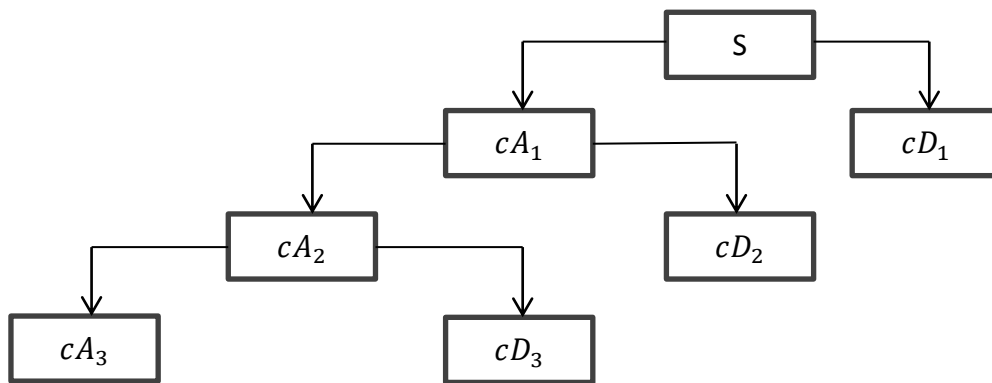


**Figure 3.14** Décomposition simple du signal  $s$  en approximations et détails

**3.3.4.2. Décomposition multi niveaux**

L’algorithme de Mallat [14]-[12] permet de décomposer le signal  $s(n)$  en plusieurs niveaux comme illustré à la figure.3.15. Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en plusieurs composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple. Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie. [14]-[12]

Le signal  $s(n)$  est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolution. Les premiers coefficients de décomposition sont  $A_1$  et  $D_1$ , où  $A_1$  est la version approximative du signal original  $s(n)$  et  $D_1$  est la représentation détaillée du signal original  $s(n)$  qui est défini dans la figure 3.16



**Figure 3.15** Décomposition du signal  $S(n)$  en multi-niveaux selon Mallat .[15]

### 3.3.4.3. Reconstruction par ondelette:

On a appris précédemment comment la TOD peut être utilisée pour analyser, ou décomposée le signal. La deuxième partie de la théorie est comment peut-on assembler ces composants pour revenir au signal original sans perdre l'information. Cette procédure est appelée la reconstruction, ou la synthèse comme montré dans la figure.3.17. La manipulation mathématique qui fait cette opération est appelée (TODI)

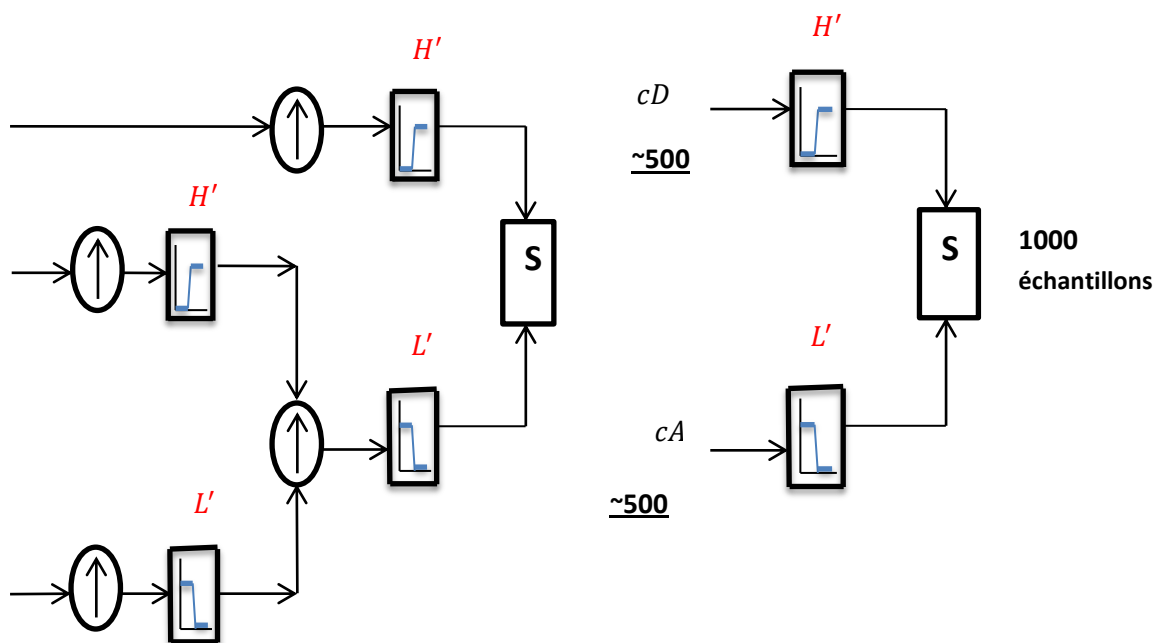


Figure 3.16 Reconstruction simple d'un signal  $S(n)$ . [15]

3.3.4.4. Décomposition et Reconstruction multi-niveau par ondelettes :

En résumé l'opération de décomposition et la reconstruction multi-niveau par l'algorithme de Mallat est schématisé par la structure suivante :

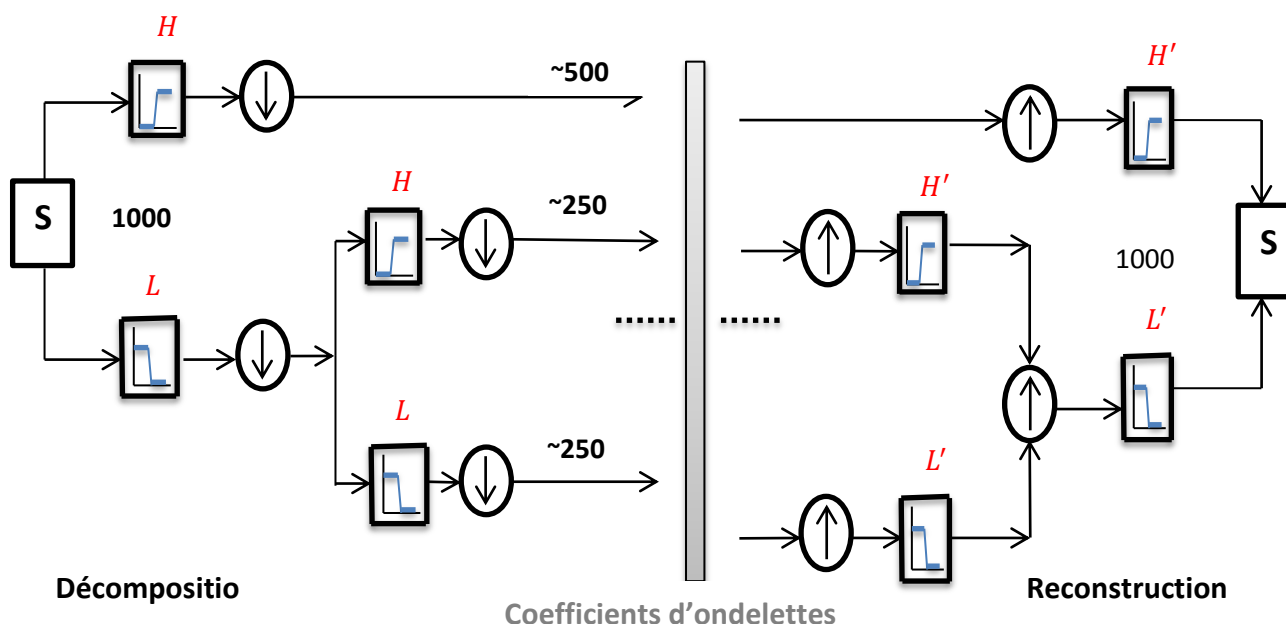


Figure 3.17 Algorithme de MALLAT multi niveau. [15]

3.3.4.5. Application de la TOD:

❖ En utilisant notre code Matlab

a-Décomposition simple:

Dans l'exemple de la figure.3.18 on a fait une décomposition simple d'un signal (lelecum) chargé de Matlab on observe clairement le signal approximation (A1) et le signal détail (D1).

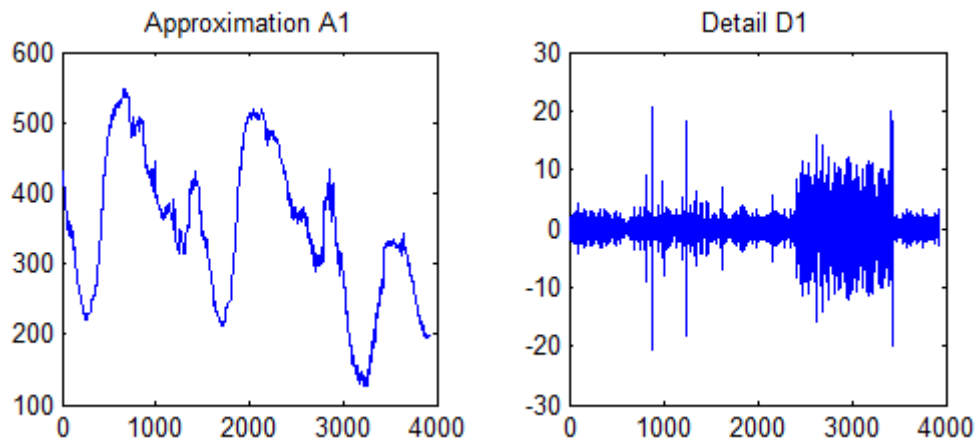


Figure 3.18 Décomposition simple représentant A1 et D1

b-Décompositions multi –niveaux:

Le même signal conserver pour la décomposition multi niveaux la figure 3.20 donne les trois détails et l'approximation du dernier niveau.

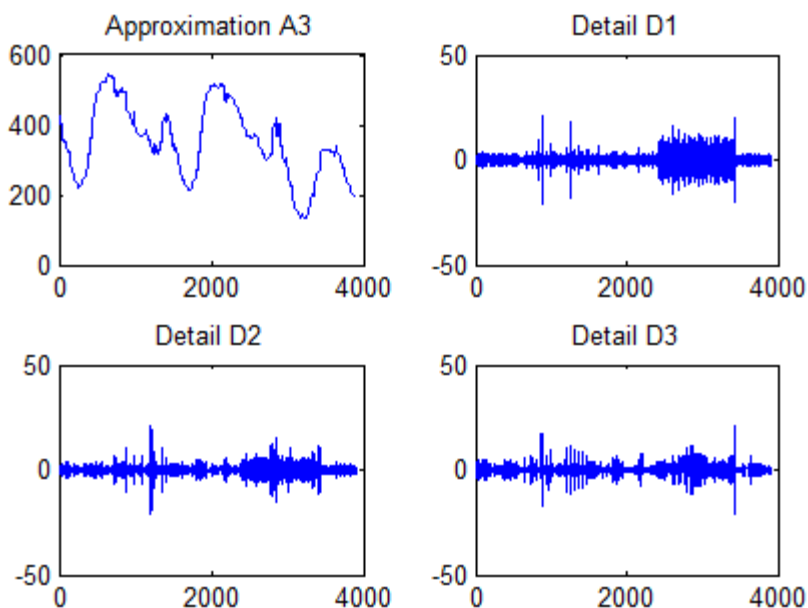
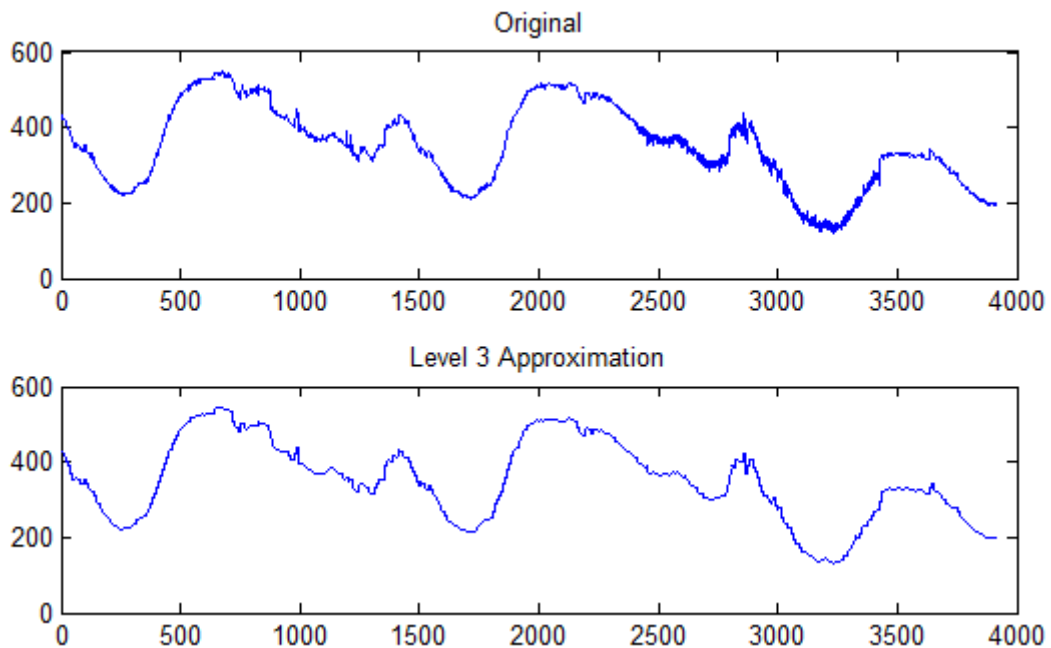


Figure 3.19 Décomposition en 3 niveaux représentant A3, D1, D2 et D3



Quand on fait une Comparaison entre le signal original et le signal approximation au niveau 3 en obtient la figure 3.20 suivante avec erreur de  $2.2737e-013$ :

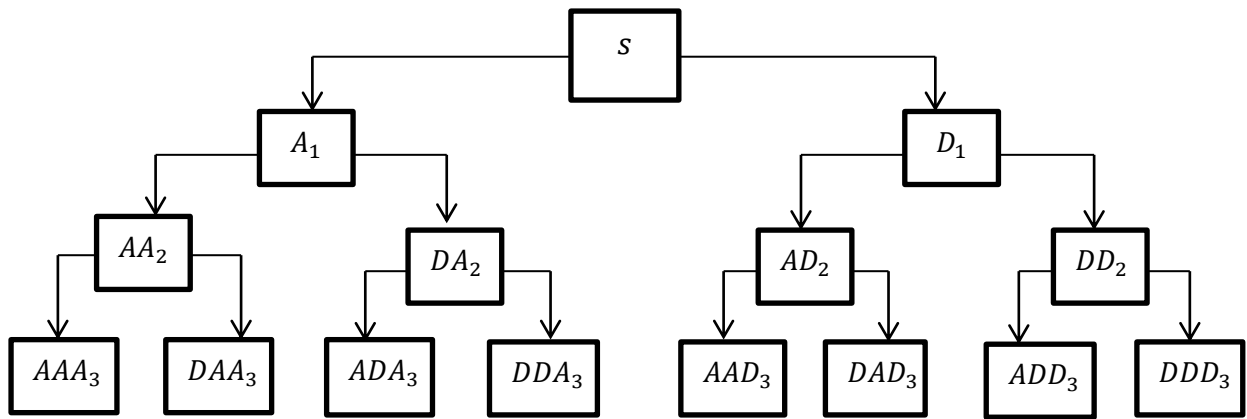


**Figure 3.20** Représentation du signal original et leur approximation A3

### 3.3.5 Décomposition par paquets d'ondelettes:

La méthode par paquets d'ondelette est une généralisation de la décomposition en ondelette discrète qui offre une gamme plus riche des possibilités pour l'analyse du signal. Dans l'analyse en ondelette, un signal est décomposé en approximation et détail. L'approximation est alors elle-même décomposée en approximation et détail de deuxième niveau, et le processus est répété. Pour une décomposition de n-niveau, il y a  $(n+1)$  manières possibles de décomposer ou coder le signal.

Dans l'analyse par paquets d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de  $2^{n-1}$  de différentes décompositions du signal. L'arbre de décomposition en paquets d'ondelettes est représenté dans la figure 3.21. [11]



**Figure 3.21** Décomposition du signal S (n) en paquet d’ondelettes d’ordre 3

Le paquet d’ondelettes décompose le signal original qui est stationnaire ou non stationnaire dans des bandes de fréquence indépendantes. Il n’y a aucune information redondante dans les bandes de fréquence décomposées. C’est une approche d’analyse efficace basée sur la multi-résolution et peut être proposée comme méthode de diagnostic de défaut. [17]

$$W_0(k) = \varphi(k) \tag{3.18}$$

$$W(k) = \psi(k) \tag{3.19}$$

Tel que  $\varphi(n)$  et  $\psi(n)$  sont la fonction d’échelle et l’ondelette mère respectivement.

La décomposition d’ordre m donne la fonction  $W_m(n)$  qu’est exprimée par :

$$W_{2m}(k) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} h(n) W_m(2k - n) \tag{3.20}$$

$$W_{2m+1}(k) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} g(n) W_m(2k - n) \tag{3.21}$$

$$W_{j,m,n}(k) = 2^{j/2} W_m(2^{-j} k - n) \tag{3.22}$$

Tels que j : paramètre d’échelle, n : paramètre de localisation en temps. Dans la pratique, un algorithme rapide est appliqué en utilisant l’étape de base de la figure 3.18 (Algorithme de Mallat). La différence est maintenant que les détails et les approximations sont coupés en composants plus fins, ayant pour résultat un arbre de paquet d’ondelettes.

Dans la figure 3.22 un exemple d’un arbre de décomposition par paquets d’ondelettes de trois niveaux est illustré. Chaque nœud de l’arbre de la décomposition en paquet d’ondelettes est classé avec une paire de nombres entiers (j, k), où j’et le niveau correspondant à la

décomposition et  $k$  est l'ordre de la position du nœud au spécifique niveau. Dans chaque niveau  $j$ , il y a  $2^j$  nœuds et leur ordre est  $k=0,1,\dots,2^j-1$ . Un vecteur de  $c_{jA}$  de coefficients de paquets d'ondelettes correspond au chaque nœud  $(j, k)$ , La longueur d'un  $c_{jA}$  de vecteur est approximativement  $N_t/2^j$ . La reconstitution des signaux est basée sur les coefficients d'approximation et les détails.

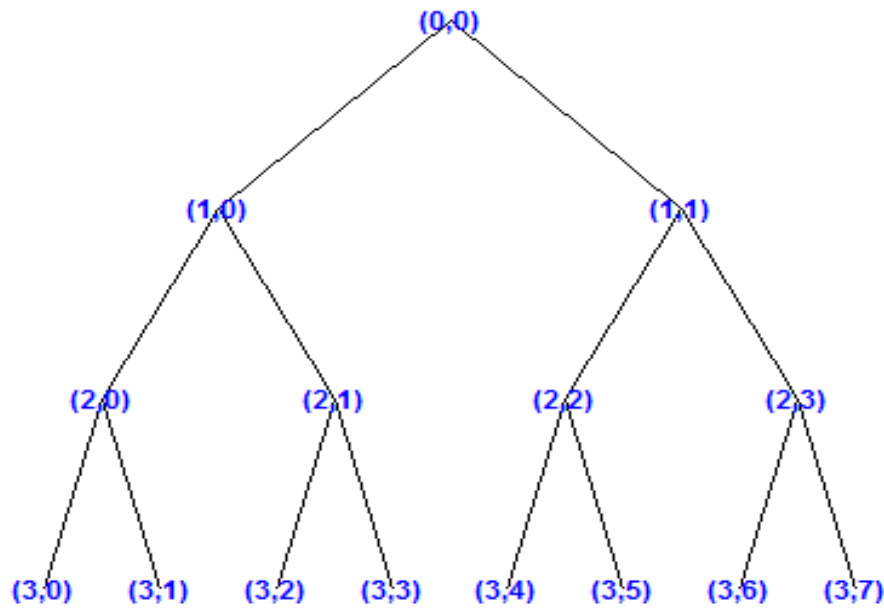


Figure 3.22 Répartition des nœuds dans un arbre de décomposition par paquet d'ondelettes.[15]

### 3.3.6 Classification des types des ondelettes

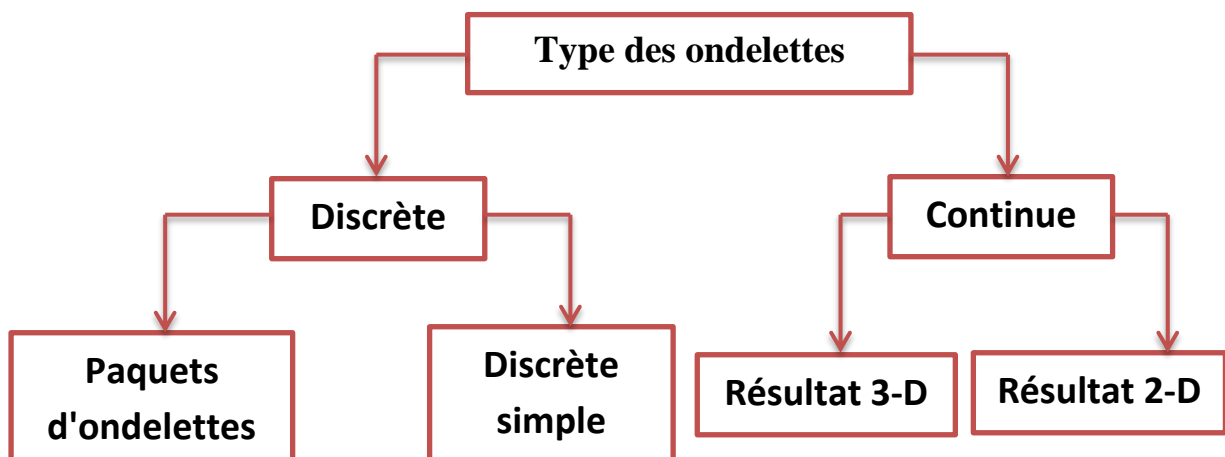


Figure 3.23 Classification des types des ondelettes

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

### 3.3.7 Critère du choix de l'ondelette mère et l'ordre de décomposition

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

#### a-choix de la fréquence d'échantillonnage

Pour une machine asynchrone, l'information significative dans le signal courant statorique est localisée au-dessous de la bande de 0-400 Hz. L'application du théorème de Shannon nous a donné un minimum de 800Hz pour la fréquence d'échantillonnage ( $f_e$ ). En outre il est nécessaire d'obtenir la résolution correcte. En cas de l'alimentation par onduleur, plusieurs harmoniques pourraient être mélangés si une basse résolution en fréquence est choisie. La résolution minimum requise pour obtenir un bon résultat est de 0.5Hz. L'équation (3.23) définit le nombre d'échantillons pour avoir la résolution correcte, [28]-[29]

$$N_e = \frac{f_e}{R} \quad (3.23)$$

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

#### b-choix du nombre de niveau de décomposition

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

À partir de la condition suivante, on peut calculer le nombre minimum de niveaux de décomposition nécessaire pour obtenir un signal d'approximation ( $a_{nf}$ ) de sorte que la limite

supérieure de sa bande de fréquence associée soit sous ou au voisinage de la fréquence fondamentale [28] :

$$2^{-(n_{LS}+f_s)}f_e < f_s \quad (3.24)$$

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

$$n_{LS} = \text{int} \frac{(\log(f_e/f_s))}{\log(2)} \quad (3.25)$$

Avec  $f_s$ : fréquence du réseau,  $f_e$ : fréquence d'échantillonnage.

Recommandé est de :

$$N_{LS} = \text{int} \frac{(\log(f_e/f_s))}{\log(2)} + 2 \quad (3.26)$$

### c-Choix du type de de l'ondelette mère

L'ondelette Dabuches 40 (db40) est utilisée souvent comme une ondelette mère. Cette fonction d'échelle réduira au minimum le recouvrement entre les bandes de fréquence qui ne peuvent pas être évitées. En fait, le recouvrement n'affecte pas l'exécution de diagnostic dans une vraie application mais il aide à améliorer l'analyse de l'approximation et des détails. [28]-[30]

## 3-4 CONCLUSION

Dans ce chapitre on a dévoilé la technique d'ondelette à travers sa théorie et son historique de Fourier vers l'ondelette, on commence par la méthode la plus classique: la TF et on a clarifié leur énorme utilisation dans le traitement du signal puis on est arrivé à montrer sa limitation dans les signaux non stationnaires à travers un exemples d'un signal non stationnaire ensuite on a passé dans la deuxième méthode c'est la transformée de Fourier à fenêtre glissante, lui-même a frustré par le principe d'Heisenberg, et on termine cet historique en arrivant à la transformée d'ondelette passant par tous ses types et avantages par rapport à la transformée de Fourier Enfin on a clôturé par une classification de tous les types d'ondelettes continue et discrète (décomposition multi niveau et par paquet d'ondelette).



### 4.1 Introduction

L'analyse directe de la modulation (ou des oscillations) perturbantes des grandeurs temporels mesurable de la machine, ne permet pas la visualisation de l'effet provoqué par un défaut au niveau de la machine, plus particulièrement lorsqu'il s'agit d'un défaut de court-circuit. La détection et la localisation du défaut d'une manière précoce paraît donc délicate.

Pour avoir discerner avec facilité la modulation de l'amplitude qui est la signature du défaut de court-circuit, une analyse de ces signaux dans le domaine fréquentiel devient une nécessité, c'est là où l'analyse spectral du courant statorique est la plus employée depuis de nombreuses années pour détecter les défaillance dans les machines électriques, par l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (FFT) qui est un outil de traitement de signal, La limitation de la FFT dans l'analyse des signaux non stationnaires mène à l'introduction de la transformée en ondelettes (TO). Elle est devenue l'une des méthodes les plus populaires et largement utilisée au diagnostic des défaillances dans plusieurs domaines durant cette dernière décennie,

### 4.2 Résultats de simulation en présence de défaut court-circuit entre spires

Avant d'appliquer la TO aux défauts de court-circuit entre spires dans le stator on veut rappeler que la modélisation de ces types des défauts a la même idée qu'on a déjà mentionné dans le chapitre deux

L'application TO au diagnostic des défauts de la MAS est basée sur les signaux des capteurs des courants statoriques, tensions statoriques, couple mécanique, vitesse, ou signaux de vibration de la machine ...etc. [27]. Notre choix est porté beaucoup plus sur les courants statoriques puisque ses signatures représentent une source très riche en informations concernant les défauts qui se manifestent souvent dans la machine asynchrone. Cet effet la majorité des travaux du diagnostic sont fondus sur l'analyse du courant statorique soit dans sa partie transitoire ou dans sa partie permanente. Ici dans notre travail de ce chapitre. On commence par le cas sain de notre MAS parce que dans ce cas le signal du courant statorique sera considéré comme un signal de base pour le comparer avec les autres signaux défaillants, ensuite par le diagnostic des défauts dans une seule phase statorique pour plusieurs valeurs de pourcentage des spires court-circuités  $\mu$  utilisée pour quantifier la sévérité du défaut.

### 4.2.1 Application de la transformée de Fourier

Dans cette section, et afin d'étudier les défauts de court-circuit entre spires, des simulations sous l'environnement Matlab ont été effectuées. Le court-circuit sur l'enroulement d'une phase statorique et le nombre de spires en court-circuit varie de 5% à 10% du nombre total de spires d'une même phase.

1. Temps de simulation  $t=4\text{sec}$
  2. Application de la charge  $C_r = 0.5N.m$  à  $t=0\text{sec}$  (démarrage en charge) et  $C_r = 3N.m$  à  $t=1\text{sec}$ .
1. Application du défaut à l'instant  $t=0\text{sec}$
  2. l'alimentation directe par réseau
    - ✓ Avec la réduction de l'enroulement de la phase A du stator de (0% 5% et 10%)

Les Spectres du courant statorique et la vitesse mécanique à l'état sain est représenté par un seul spectre à la fréquence 50 Hertz ce spectre correspond la fréquence fondamentale de la machine.

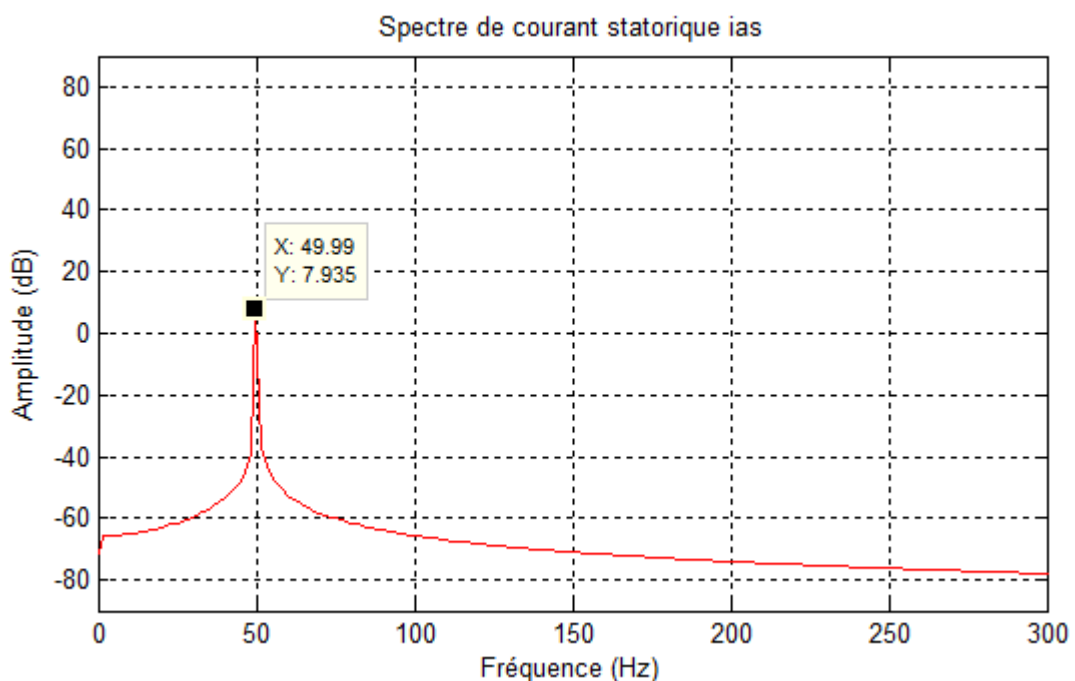


Figure 4.1.a Spectre du courant statorique dans l'état sain  $\mu=0\%$



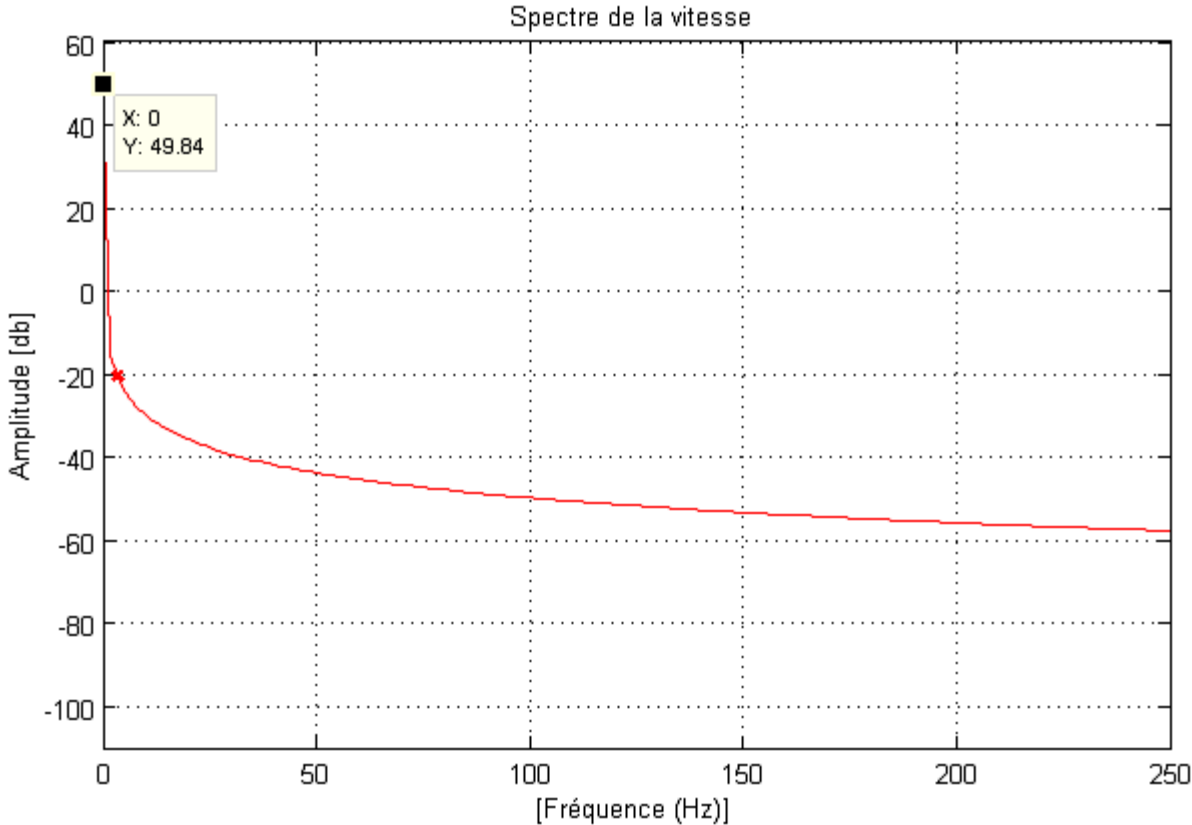


Figure4.1.b Spectre de la vitesse mécanique dans l'état sain  $\mu=0\%$

Le Spectres du couple électromécanique à l'état sain est représenté par un seul spectre à la fréquence 0 Hertz.

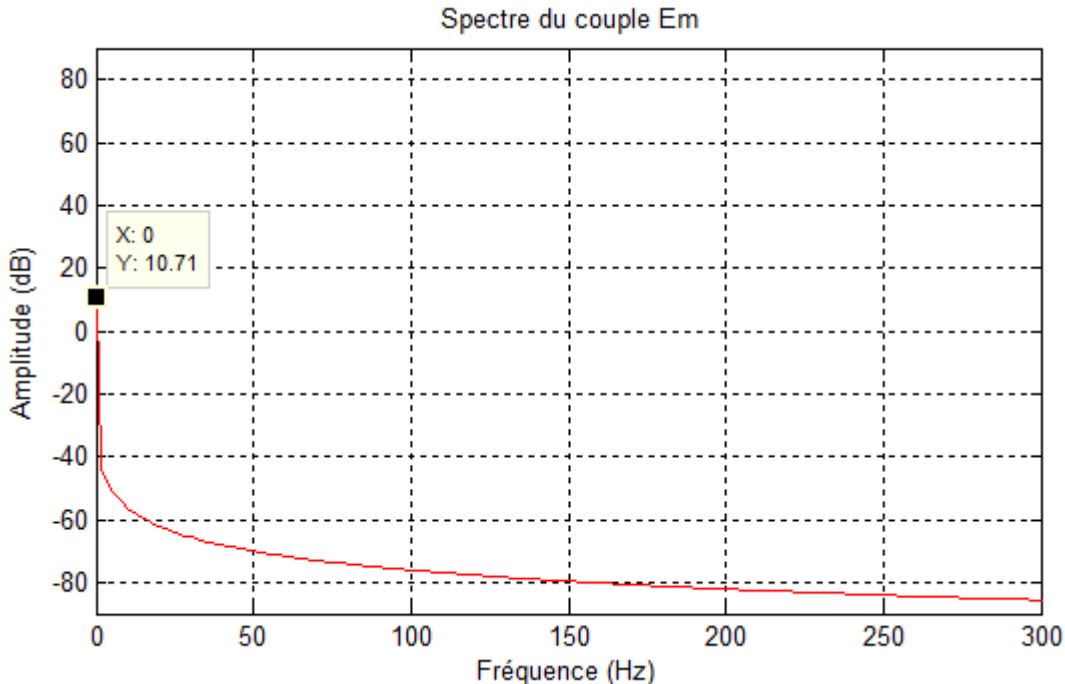


Figure4.1.c Spectre du couple électromécanique mécanique dans l'état sain  $\mu=0\%$

## Chapitre 4 Application de la technique des ondelettes au diagnostic

Les suivantes figure s'est expose la transformée de Fourier avec défaut de court-circuit  $\mu=5\%$  par l'apparition d'une nouvelle raie à la fréquence 150 Hertz dans les spectres de courant satatrique et la vitesse mécanique , et pour le couple électromécanique l'apparition de nouvelle raie a la fréquence 100 Hertz

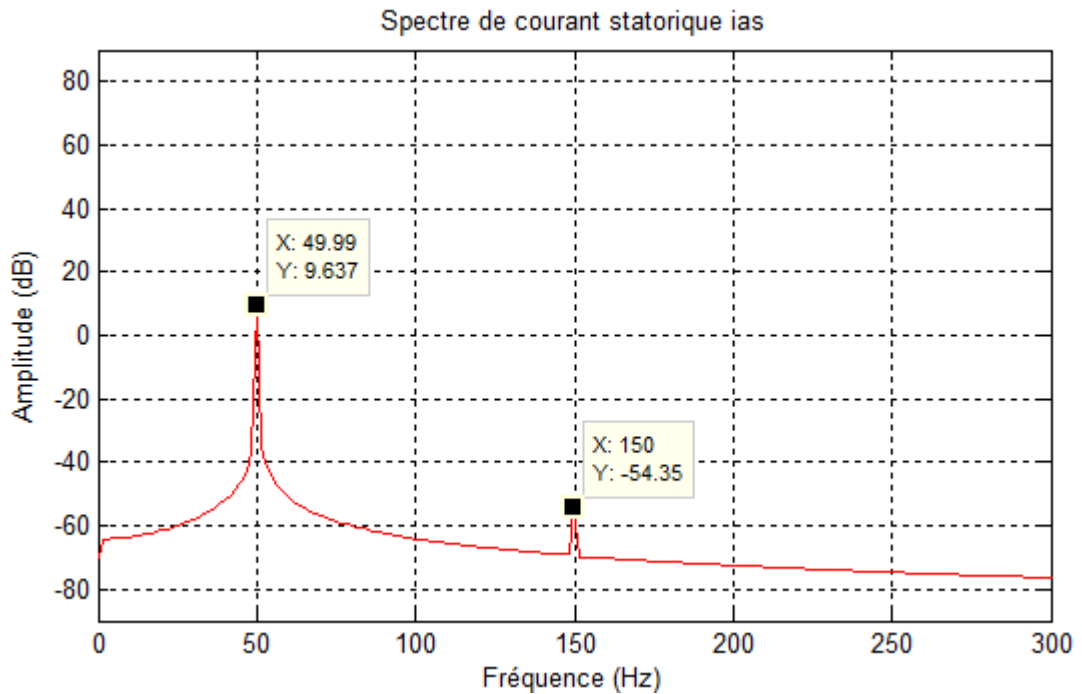


Figure4.2.a Spectre du courant statorique dans l'état défaillant  $\mu=5\%$

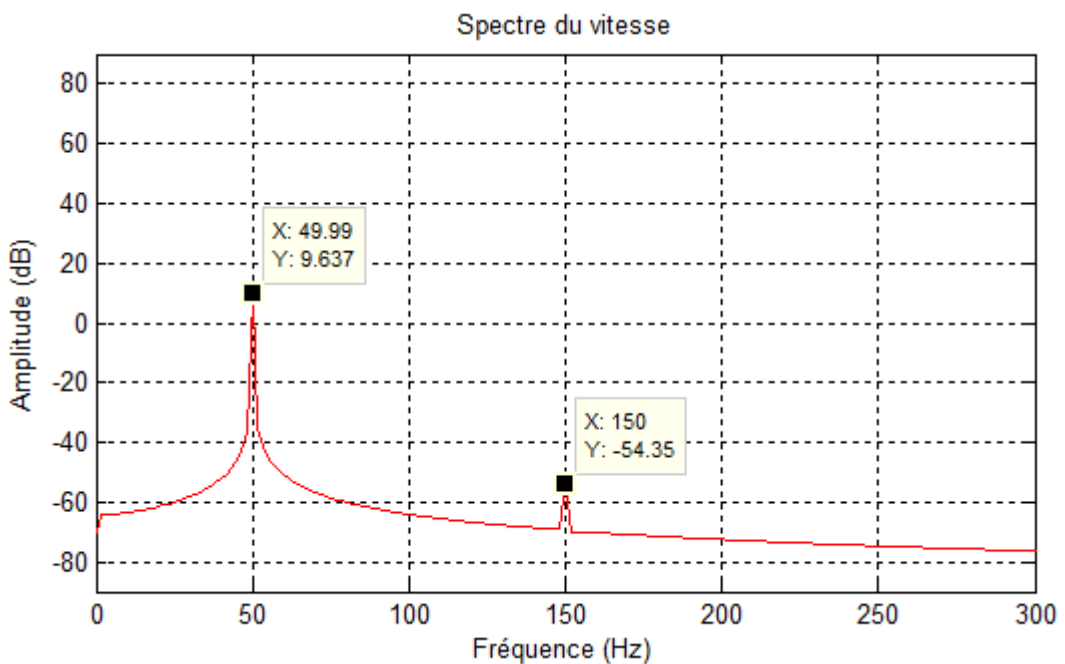


Figure4.2.b Spectre de la vitesse mécanique dans l'état défaillant  $\mu=5\%$

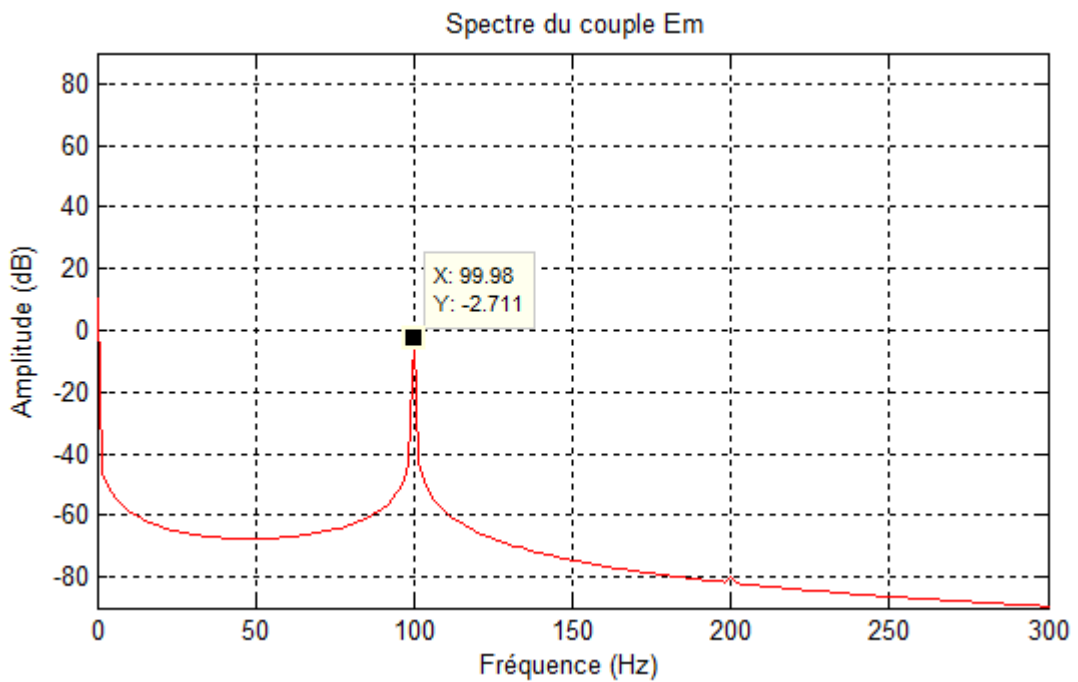


Figure4.2.c Spectre du couple électromécanique a l'état défaillant  $\mu=5\%$

Les suivantes figure expose la transformée de Fourier avec défaut de court-circuit  $\mu=10\%$  par l'apparition d'une nouvelle raie à la fréquence 200 Hertz dans les spectres de couple électromécanique

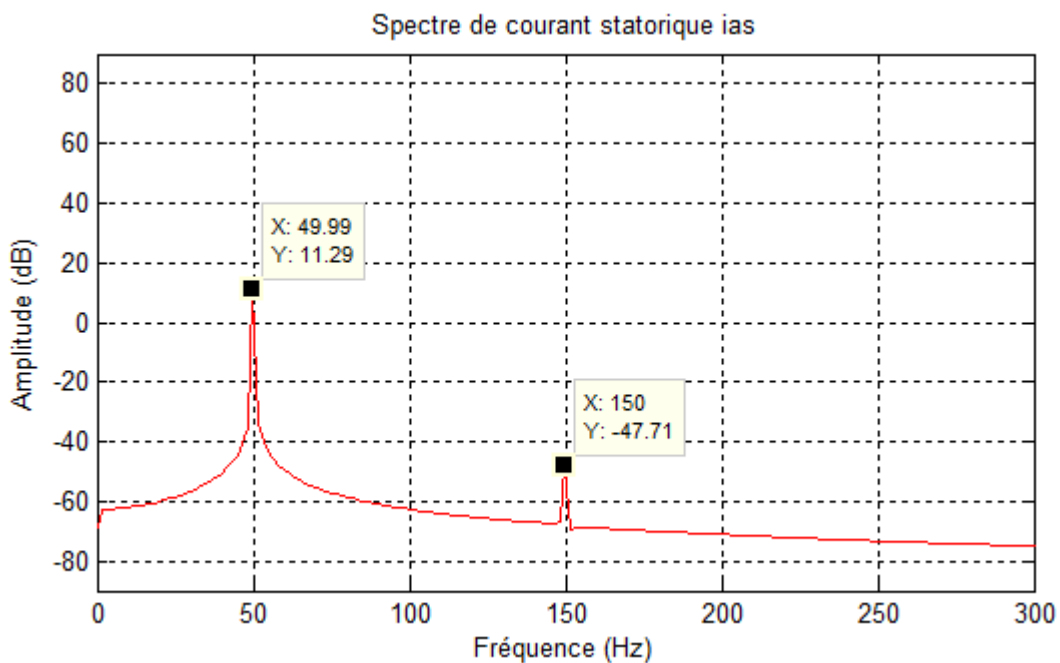
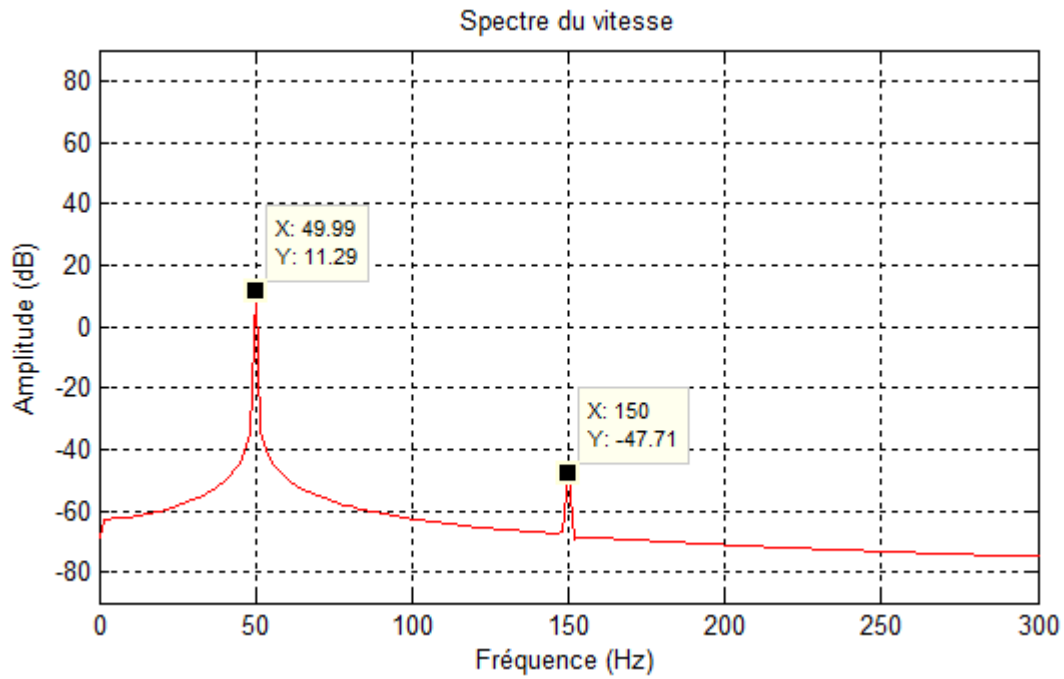
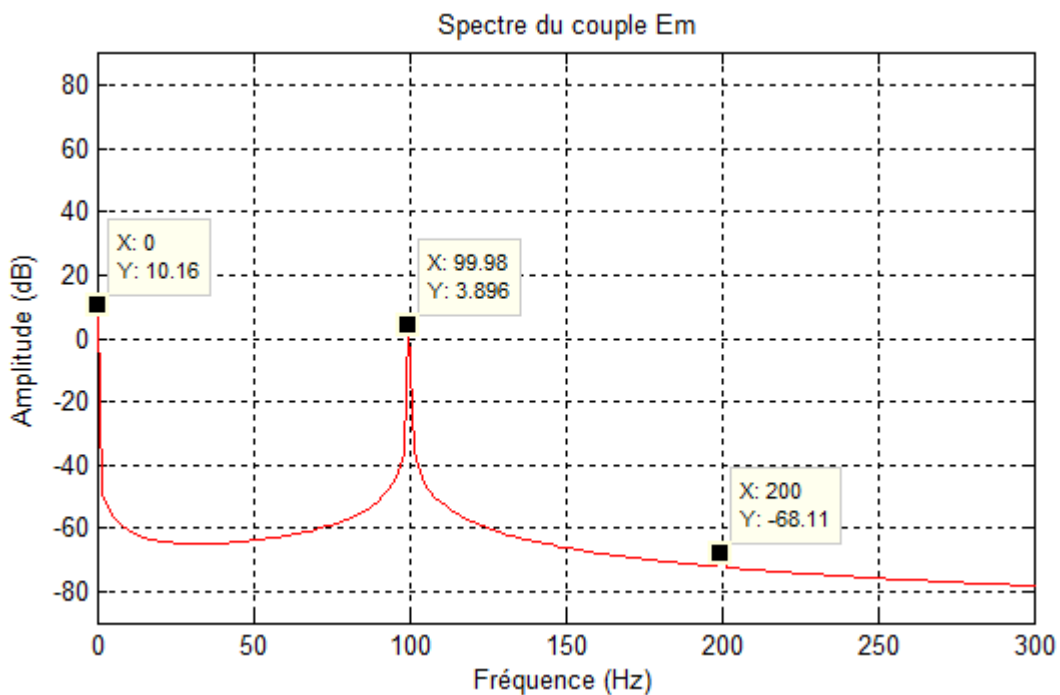


Figure4.3.a Spectre du courant statorique dans l'état défaillant  $\mu=10\%$



**Figure4.3.b** Spectre de la vitesse mécanique dans l'état défaillant  $\mu=10\%$



**Figure4.3.c** Spectre du couple électromécanique a l'état défaillant  $\mu=10\%$

Une analyse spectrale du courant statorique et la vitesse mécanique d'un moteur défaillant fait apparaître de deux pics, le premier correspond à la fréquence fondamentale 50Hz et l'autre à 150Hz qui signifie la fréquence de court-circuit.

On voit que  $(k * f_s) = f_{cc} = 150\text{Hz}$ , donc  $K = 3$ .

## Chapitre 4 Application de la technique des ondelettes au diagnostic

Lorsqu'on applique un court-circuit supérieur, l'amplitude de fréquence fondamentale et fréquence de court-circuit augmente aussi  $f_{cc}$  ( $k * f_s$ ) avec  $k$ : nombre impair.

### 4.2.2 Application des techniques ondelettes

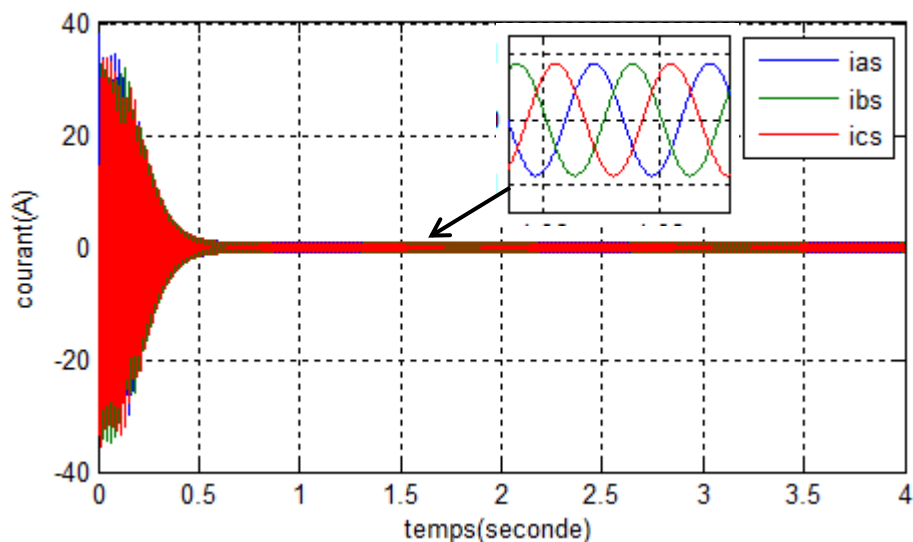
Nous présentons un examen de la technique des ondelettes sur des résultats de le cas sain . Le traitement des signaux est réalisé à l'aide de logiciel MATLAB qui offre un outil de traitement par la technique des ondelettes (WAVELET TOOLBOX), cette boîte d'outils nous permettra de réaliser les différentes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

### 4.2.3 Application de la TOC

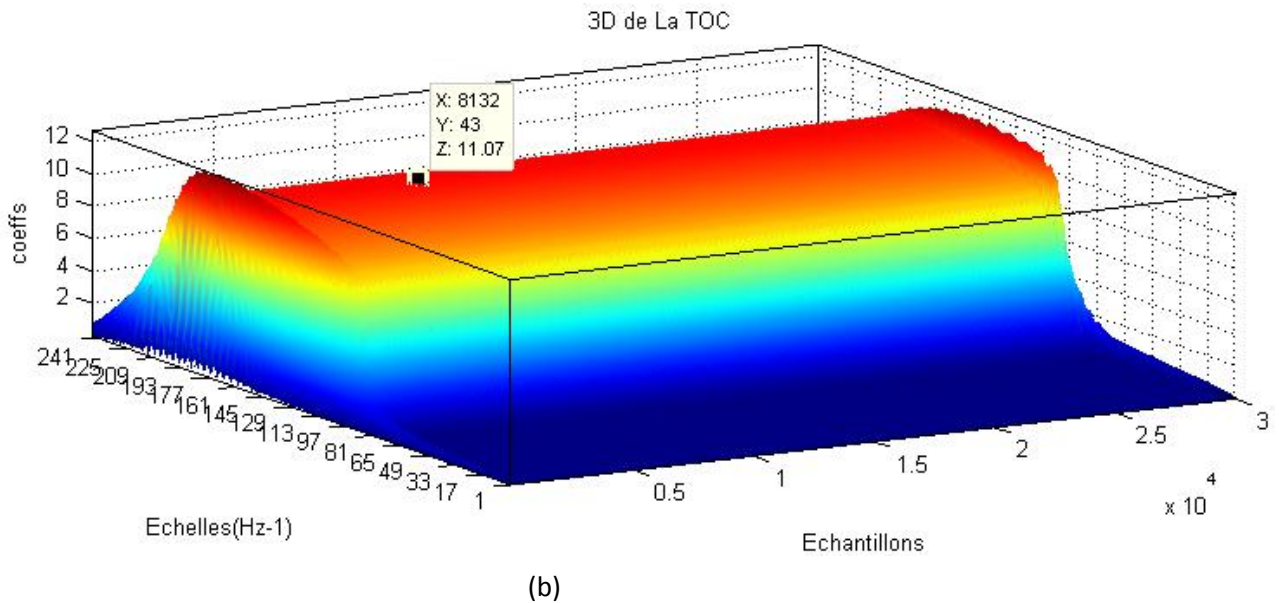
Notre application de la transformée d'ondelette est réussie en utilisant l'ondelette Daubechies d'ordre 40 (db40) avec échelle de taille 248 du pas égale à 4 c'est ce qui permettra d'assurer une bonne résolution temporelle et fréquentielle.

#### a- L'état sain

La figure 4.4 représente les signaux des courants statoriques et ses zoom dans le régime permanent ainsi la TOC de l'un de ces signaux ( $i_{as}$ ) avec  $\mu = 0$



(a)



**Figure4.4** (a) Courants des phases statoriques sain,

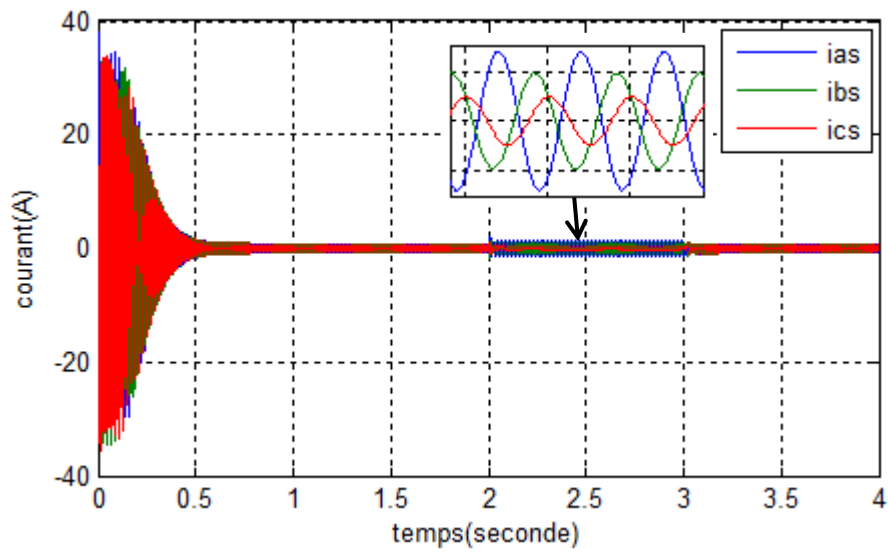
(b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente)

D'après la figure. 4.4 On peut remarquer que les amplitudes des coefficients d'ondelettes du signal de courant statorique est stable. Ces coefficients peuvent être considéré comme des valeurs de base pour les comparer après avec les coefficients des états défectueux de la MAS

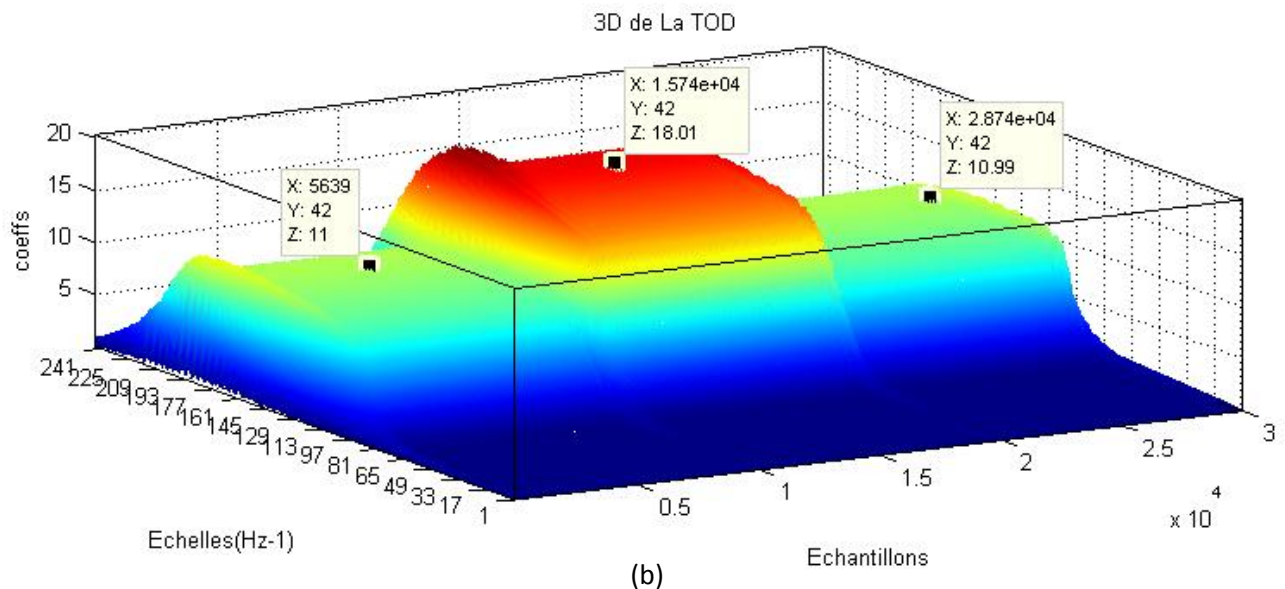
### **b- Défaut de court-circuit dans une seule phase statorique**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent [31]. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée comme illustré dans la figure 4.5 Le défaut a été créé à  $t=1.5\text{sec}$  et couronné par  $t=2.5\text{sec}$ . En effet la signature du courant statorique a une légère variation de l'amplitude et un déséquilibre durant cette période, le zoom de courants statoriques montre bien cette légère augmentation.

Ensuite une augmentation est apparait dans la transformée d'ondelettes continue en 3-D de l'un des courants statoriques. Cela signifie que la représentation temps échelle détecte bien le défaut et l'amplitude des coefficients de ce défaut augmente en fonction de nombres de spires court-circuitées.



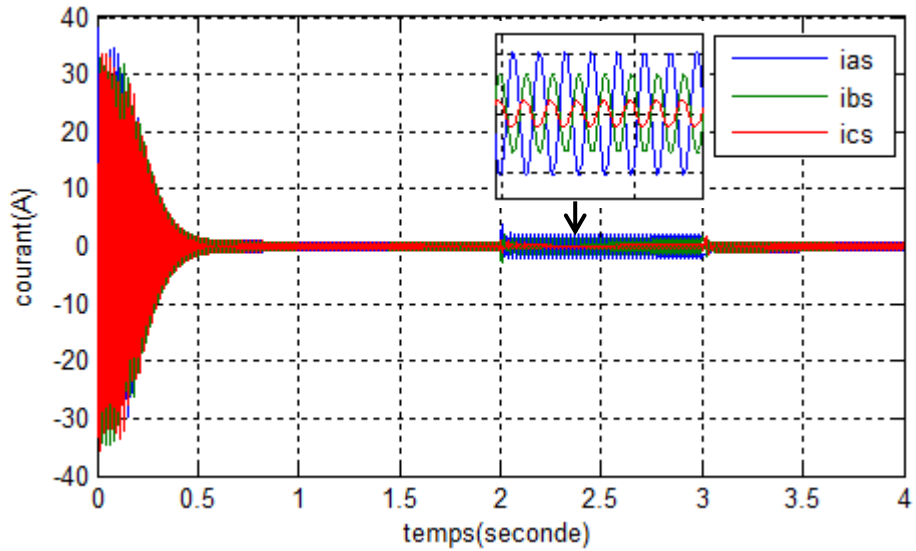
(a)



(b)

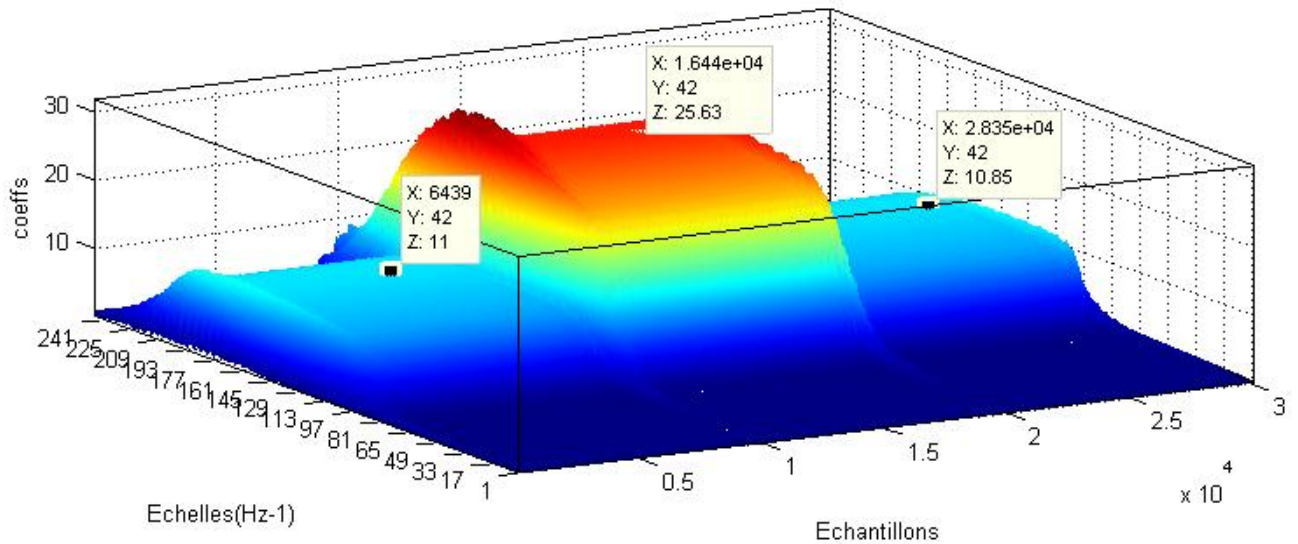
**Figure 4.5** (a) Courants des phases statoriques en présence de défaut  $\mu = 15\%$ ,  
 (b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente)

Les figures suivantes (4.6 ,4.7) démontrent l'efficacité d'ondelettes et résument la variation du CC entre spires et donnent le coefficient d'ondelettes maximal de chaque cas :



(a)

3D de La TOD

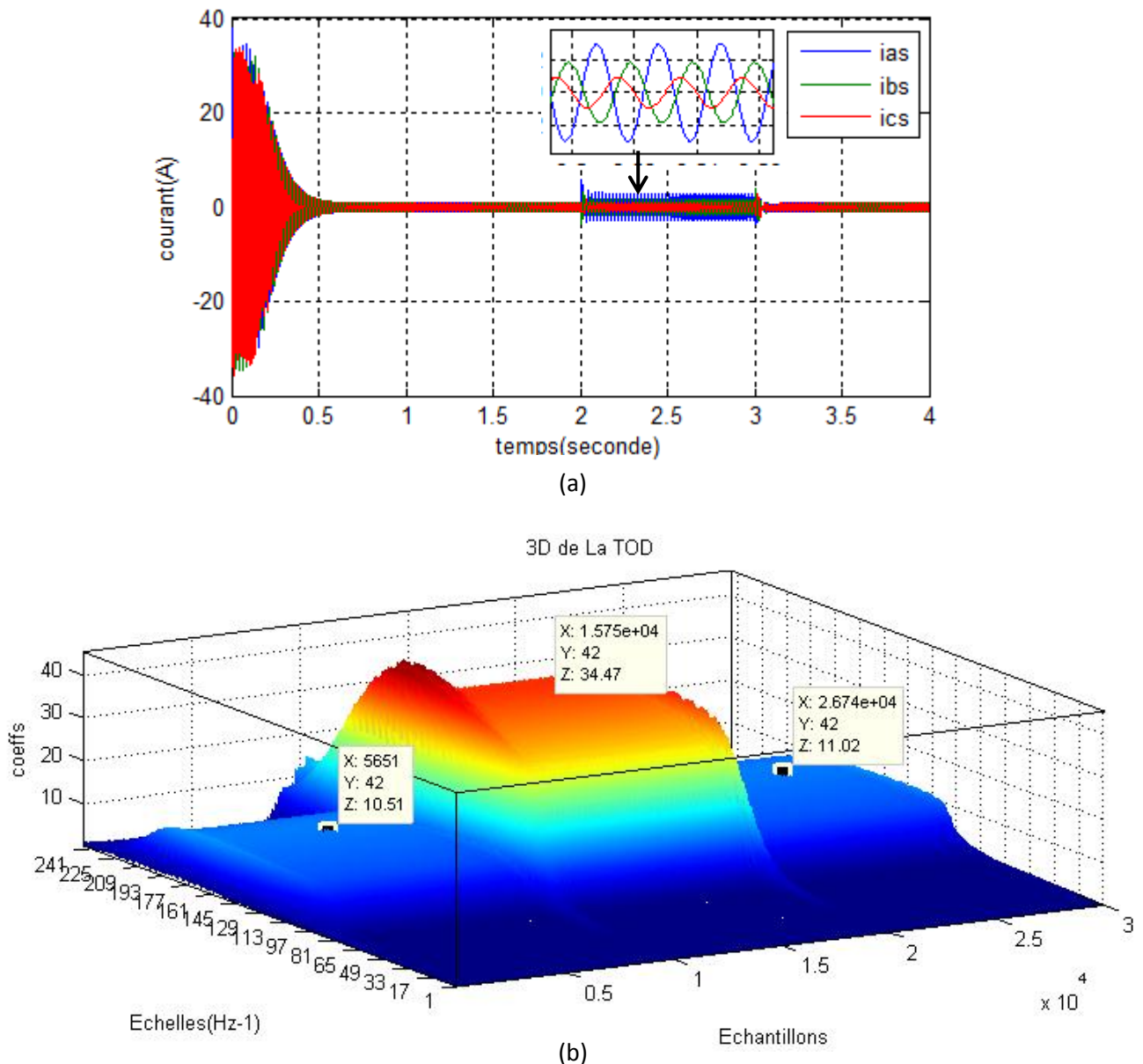


(b)

**Figure 4.6** (a) Courants des phases statoriques en présence de défaut  $\mu = 10\%$ ,  
 (b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente)

On remarque qu'une augmentation plus grande dans les coefficients d'ondelette est apparait pendant la durée de défauts, la même chose sera apparaitre dans les figures suivante en fonction de sévérité des défauts.





**Figure 4.7** (a) Courants des phases statoriques en présence de défaut  $\mu = 15\%$ ,  
 (b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente)

A partir de ces résultats on peut dire que la TOC localise bien le défaut on remarque aussi qu'on a un système défaillant l'intervalle de simulation est Idem et les coefficients d'ondelette augmente proportionnellement avec le coefficient de défaut  $\mu$ .

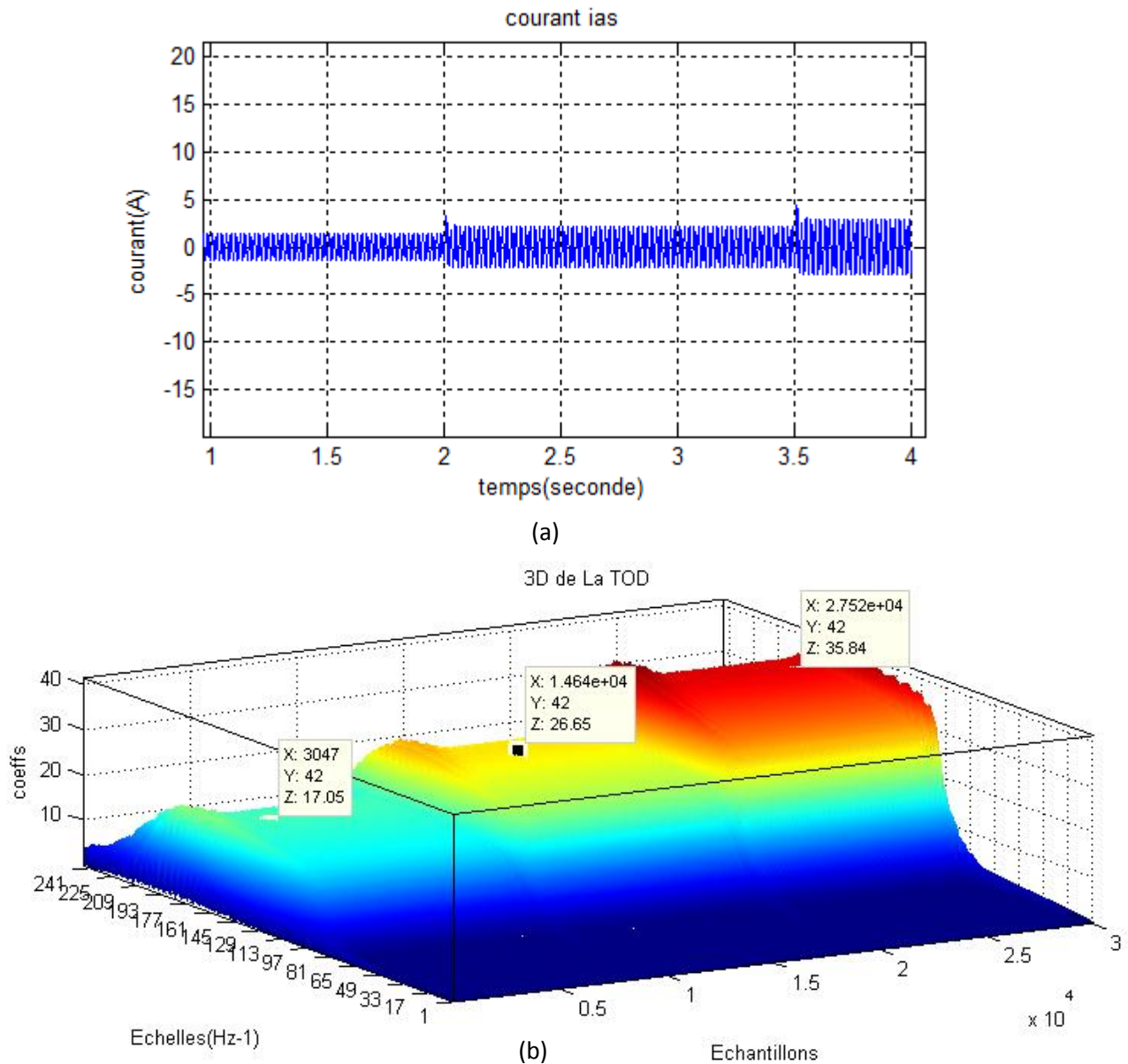
**c-Variation de Défaut de court-circuit dans une seule phase statorique**

La figure 4.8 représente (a)le signal de courant statorique de la phase «a» en régime permanent et aussi la, (b) TOC de signal de courant (ias).

## Chapitre 4 Application de la technique des ondelettes au diagnostic

Dans cette partie nous avons créés les défauts de court-circuit entre spires dans la phase «a»  
On augmente ces valeurs à des instants successifs comme suit:

- à l'instant  $t=1s$  en a créé un défaut  $\mu=5\%$  dans la phase «a»
- à l'instant  $t=2s$  en augmente le défaut à 10%
- à l'instant  $t=3s$  en augmente le défaut à 15%



**Figure 4.8** (a) Courants de phases statoriques «a»

(b) TOC du courant de la phase statorique «a»(en régime permanente)

Nous remarquons d'après cette figure que l'amplitude de coefficients d'ondelettes est change proportionnellement avec le changement de  $\mu$  ainsi que les instants de l'apparition de défauts aussi claire et successifs en fonction de nombres d'échantillons.

### 4.2.4 Application de la transformée d'ondelettes discrète:

La décomposition multi-niveau du courant statorique est réalisée en utilisant l'ondelette mère Daubechies 40 et le niveau de décomposition nécessaire est calculé d'après la relation :

$$N_{Ls} = \text{int} \frac{(\log(f_e/f_s))}{\log(2)} + 2$$

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

$$N_{Ls} = \text{int} \frac{(\log(10^4/50))}{\log(2)} + 2 = \text{int}(7.6439) + 2 = 9 \text{niveau}$$

Le Tableau 4.1 indique les différentes bandes de fréquence obtenues par la décomposition en ondelettes discrète.

Tableau 4.1 Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau				
Niveau	Bandes de fréquences Approximations		Bandes de fréquences Détails	
	j=1	A1	0-5000	D1
j=2	A2	0-2500	D2	2500-5000
j=3	A3	0-1250	D3	1250-2500
j=4	A4	0-625	D4	625-1250
j=5	A5	0-312.50	D5	312.50-625
j=6	A6	0-156.25	D6	156.25-312.50
j=7	A7	0-78.125	D7	78.125-156.25
j=8	A8	0-39.0625	D8	39.0625-78.125
j=9	A9	0-19.5313	D9	19.5313-39.0625

### ❖ Décomposition multi niveaux du courant statorique:

Dans notre décomposition multi-niveaux du courant statorique on a utilisé Daubechies 40 comme ondelette mère et on a choisi de représenter dans nos figures que les derniers signaux détails (D7, D8, D9) et le signal d'approximation A9, on commence par l'état sain pour le comparer avec les états défaillants :

Les suivantes figures (4.8 jusqu'à 4.12) représentent la décomposition multi niveau des états suivants:

- Sain
- Court-circuit monophasé avec  $\mu=5\%$
- Court-circuit monophasé avec  $\mu=10\%$
- Court-circuit monophasé avec  $\mu=15\%$
- Court-circuit monophasé on applique les trois valeurs de  $\mu$  (5%, 10% et 15%) à des instants successifs comme suit:

➤ à l'instant  $t=1s$  en a créé un défaut  $\mu=5\%$  dans la phase «a»

➤ à l'instant  $t=2s$  en augmente le défaut à 10%

➤ à l'instant  $t=3s$  en augmente le défaut à 15%

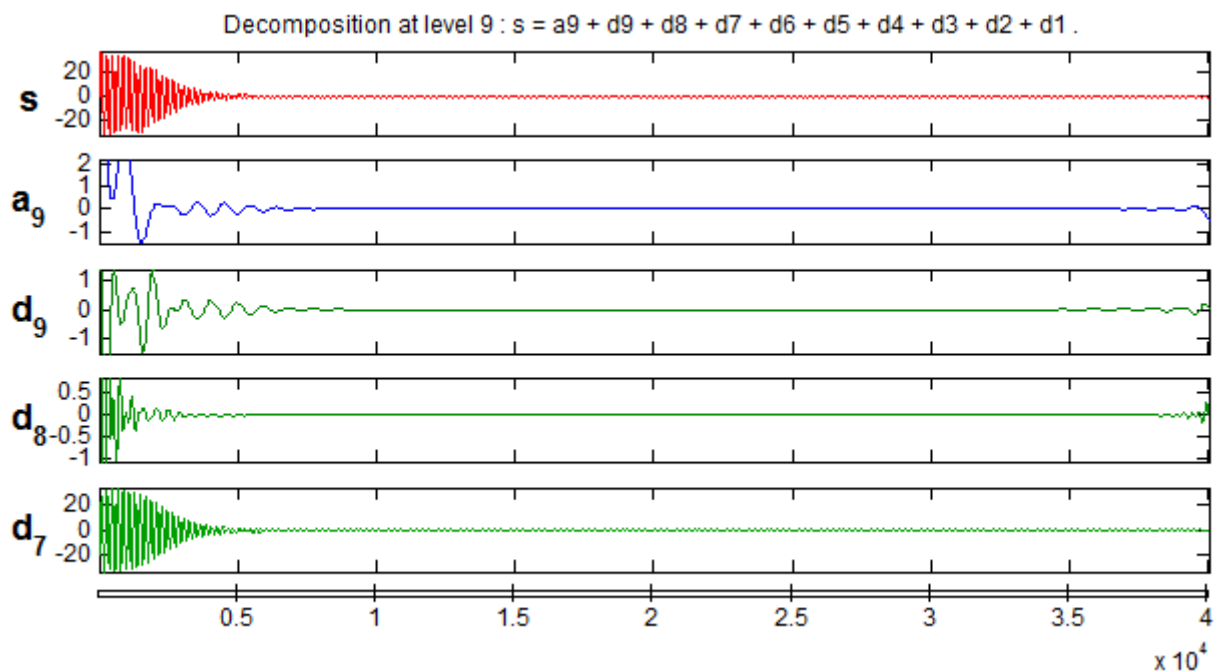


Figure 4.9 Décomposition multi niveau du courant statorique (ias) état sain

## Chapitre 4 Application de la technique des ondelettes au diagnostic

D'après les signaux d'approximation et détail A9 et D9 de la figure 4.8 leurs valeurs d'amplitude est proche à zéro par contre dans les figures (4.9, 4.10 et 4.11) ou le défaut est dans une seule phase statorique on observe une augmentation dans l'amplitude du signal A9 et D9 le temps de création de défaut.

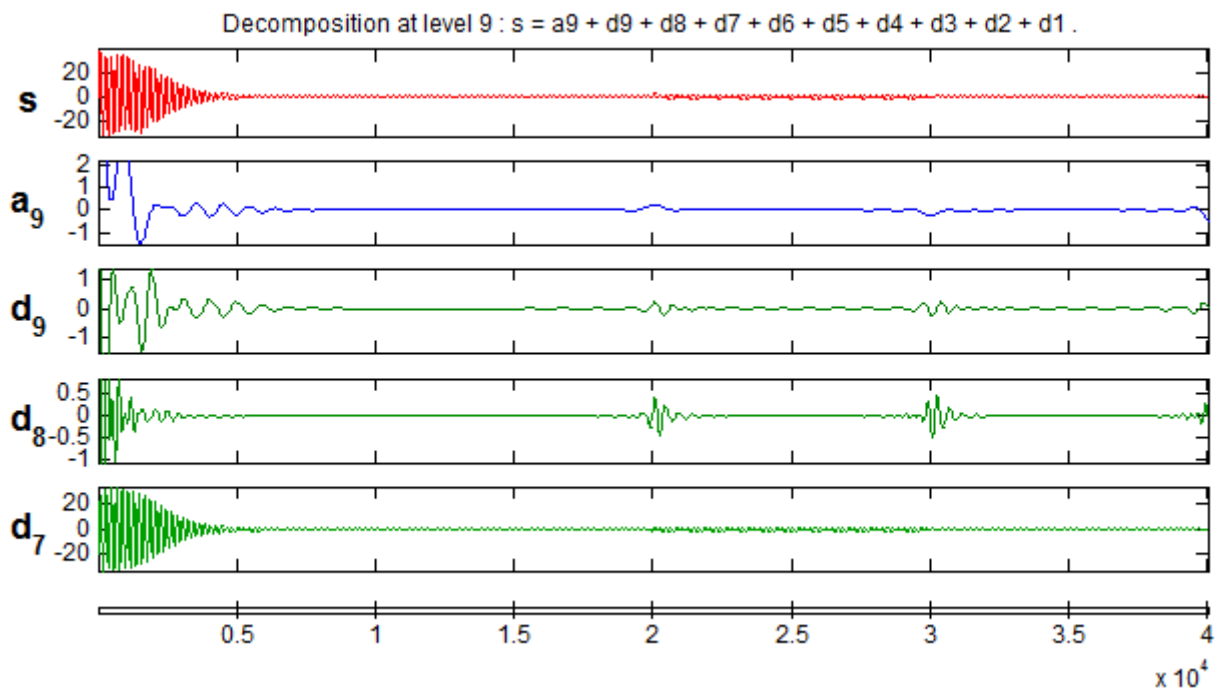


Figure 4.10 Décomposition multi niveau du Courant statorique en présence de défaut  $\mu = 5\%$ ,

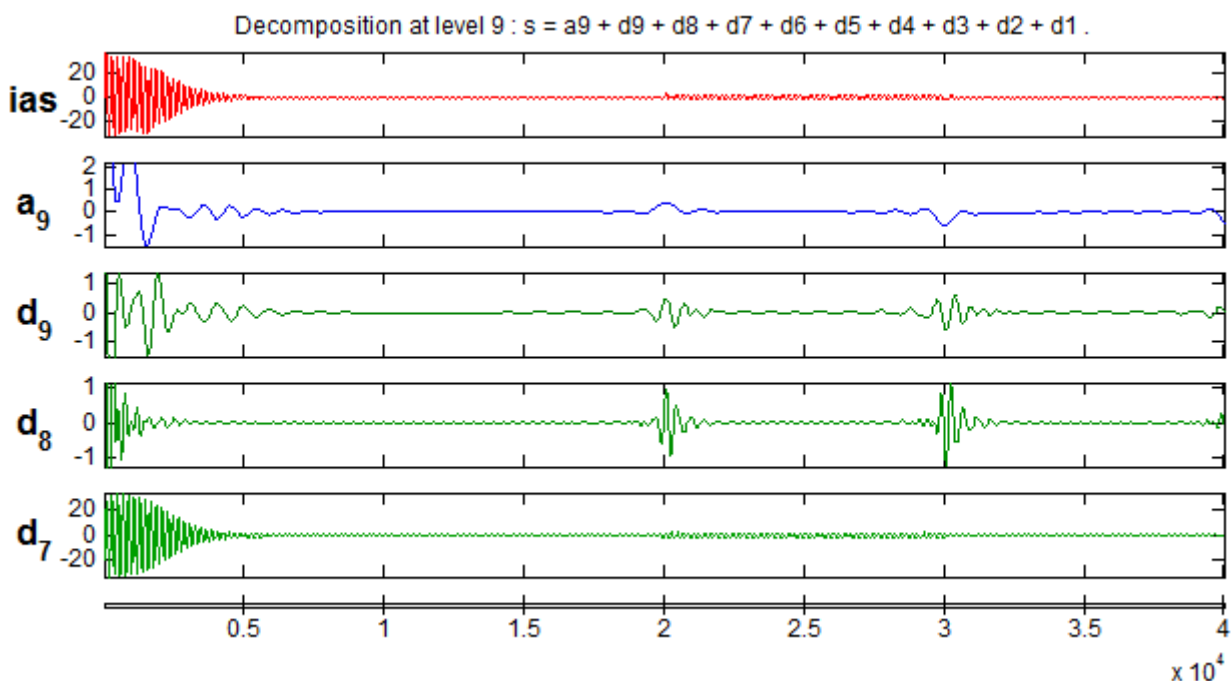


Figure 4.11 Décomposition multi niveau du Courant statorique en présence de défaut  $\mu = 10\%$ ,

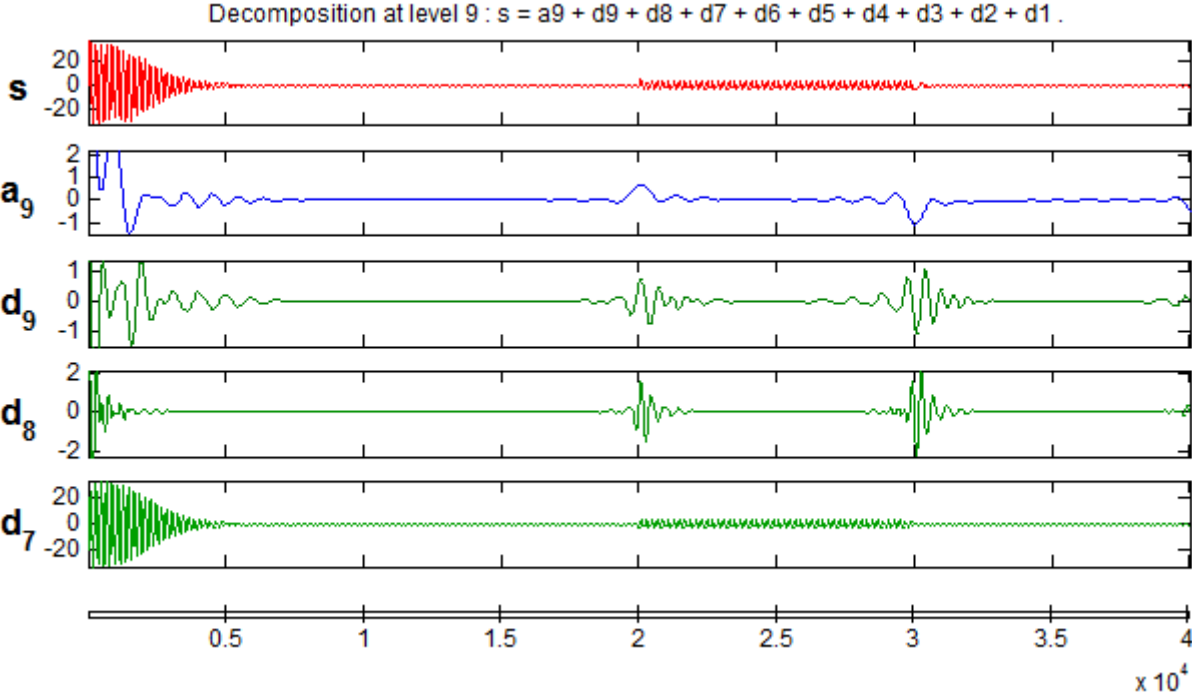


Figure 4.12 Décomposition multi niveau du Courant statorique en présence de défaut  $\mu = 15\%$

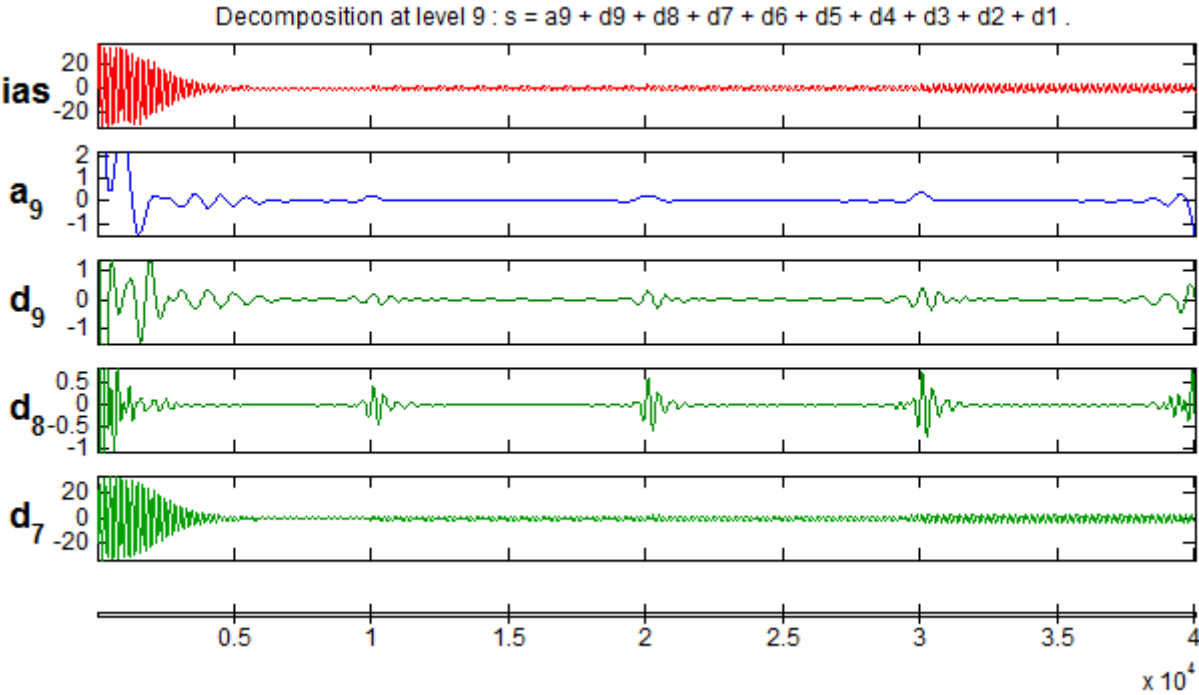


Figure 4.13 Décomposition multi niveau du Court-circuit monophasé on alpique les trois valeurs de  $\mu$  (5%, 10% et 15%) à des instants successifs

## **Chapitre 4 Application de la technique des ondelettes au diagnostic**

---

On constate que l'utilisation de la technique des ondelettes permet d'extraire et de localiser le point de la non-stationnarité dans les signaux non stationnaires. La non-stationnarité qui accompagne l'application de défaut de court-circuit entre spires statorique et l'élimination de ce défaut ou la variation de ce de dernier, est extraite dans les deux signaux de détail D9 et D8. Comparons les signaux de détail et d'approximation obtenus pour les machines avec défauts, l'amplitude des coefficients D7, D8, D9 et A9 est augmentée par rapport à la machine saine. Cette augmentation de l'amplitude dans les signaux D7, D8, D9 et A9 est due à l'effet que les bandes de fréquence correspondantes sont affectées par les différents types de défauts.

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

### **4-3 Conclusion**

Dans ce chapitre on a appliqué la transformée en ondelettes continue en Trois dimensions dans les signaux des courants des phases statorique et ils ont abouti à des résultats très significatifs et satisfaisants pour détecter les défauts de court-circuit entre spires dans la MAS, ensuite la transformée d'ondelettes discrète du courant statorique nous a donné une représentation réelle sur les défauts de court-circuit de la MAS. La détection du non stationnarité produite dans le courant statorique lors de l'apparition de défauts de court-circuit est réussie par la décomposition en multi-niveau

## Introduction générale

La place prestigieuse qu'occupe les machines électrique dans l'industrie moderne, nécessite entre autres une mise en place des programmes de maintenances préventives et correctives et de surveillance afin d'assurer la continuité de leur bon fonctionnement. En effet, ces fonctions permettent, en partie, d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations.

Un système de surveillance doit permettre de valider les données utilisées par les algorithmes de commande mais aussi de fournir des informations sur le fonctionnement de l'unité aux opérateurs qui l'exploitent. Il doit être capable de provoquer dans les cas graves un arrêt de l'unité ou de permettre au système de production de continuer de fonctionner en mode dégradé en cas de problème ne nécessitant pas un arrêt immédiat, tout cela en évitant bien sûr des erreurs de type fausses alarmes qui provoquent des arrêts inutiles des installations. Les tâches de détection et de localisation des défaillances trouvent ainsi tout naturellement leur place dans un tel système de surveillance. Il existe plusieurs procédures de diagnostic. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système. Ainsi, deux principales familles de procédures peuvent être utilisées dans le domaine de diagnostic des machines électriques à savoir les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori et sans connaissance a priori.

Les méthodes de diagnostic sans connaissance a priori sont basées sur l'extraction d'informations par le biais du traitement des signaux mesurés qui sont (courants, tensions, vitesse, couples, vibrations, température). Ces signaux peuvent fournir des informations significatives sur les défauts.

Les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori reposent sur le suivi des paramètres et des grandeurs de la machine, au moyen d'algorithmes d'observations. Elles détectent les défaillances en comparant l'évolution de l'écart entre le modèle et le processus réel. Le principal avantage de cette méthode réside dans l'intégration d'une connaissance a priori du système et donc un filtrage de l'information.

Dans le cas de la modélisation des machines électriques en vue du diagnostic, il est essentiel d'envisager deux modes; un mode commun et un autre différentiel. Le mode commun doit correspondre au modèle dynamique traduisant le fonctionnement sain de la machine.



# Introduction général

---

Le mode différentiel a pour objectif de traduire son dysfonctionnement. Ses paramètres doivent être essentiellement sensibles au défaut.

La connaissance initiale - i.e. connaissance à priori- relative à la machine saine ou défaillante, permet d'un côté d'accélérer la convergence de l'algorithme de la Programmation Non Linéaire utilisé, et d'un autre côté de la rendre robuste. Cette approche étant basée sur l'identification des paramètres d'un modèle de la machine, l'un des objectifs les plus importants, dans le cadre du diagnostic, concerne la mise au point de modèles mathématiques réellement représentatifs d'un fonctionnement en défaut.

L'objectif principal du présent travail de recherche est d'exploiter la méthode des ondelettes méthode pour le diagnostic des défaillances des machines électriques où l'accent est mis particulièrement pour la détection des quelques défauts statorique de la machine asynchrone à cage.

Dans cette méthode, le diagnostic par la technique des ondelettes est effectué et validé par simulation dans l'environnement Matlab. Cette technique propose une analyse très fine des signaux et permet de détecter le non stationnarité dans les signaux où cette particularité est non disponible dans les techniques classiques. Telles que : l'analyse de Fourier et l'analyse de Fourier à fenêtre glissant, etc.

## **Structure du mémoire**

Pour satisfaire les besoins de ce mémoire, notre travail s'articule principalement autour de 04 chapitres.

- Le premier chapitre sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone, et la modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux.
- Dans le deuxième chapitre nous présenterons à la modélisation et simulation de la machine asynchrone (sain et avec defallience),
- Dans le troisième chapitre, en présentera la technique de ondelette et ces applications.
- Le quatrième chapitre nous présenterons le résultat de simulation de la technique des ondelettes.

## **Bibliographie**

- [01] **A. Bouzida** .diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Thèse de Magister .Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Algérie 2008
- [02] **A. Allal**. Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines électriques. Thèse de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2010.
- [03]. **Gaëtan Didier** « modélisation et diagnostic de machine asynchrone en présence de défaillances » thèse de Doctorat, université Henry Poincaré, Nancy I , octobre 2004.
- [04] **Radouane BOUSSEKSOU** modélisation analytique des machines asynchrones 2007
- [05]. **MERABET AHMED - RECHDANE MOHAMM**. Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence des Défauts Statoriques. Universities Bordj Bou Arreridj. Algérie 2010.
- [06] **achor abdelmalak** réglage par moda glissant d'une machine asynchrone M'SILA 2004-2005
- [07] **BOURDIM SAMIA** «Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones» Mémoire de Magister 2011. UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF UFAS (ALGERIE)
- [08] **V .Perrier** Idée de la base Application de la théorie des ondelettes, Laboratoire de Modélisation et Calcul de l'IMAG Institut National Polytechnique de Grenoble 2005.
- [09] .Technique de l'ingénieur 2009.
- [10] **M. Misiti. Y. Misiti. G. Oppenheim. J. M. Poggi**. Wavelet Toolbox for Use with MATLAB 2010.
- [11] **BOURDIM SAMIA** Contribution au diagnostic des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna.2015
- [12] **S. Mallat** "A wavelet tour of signal processing" a Harcourt science and technology company Elsevier (USA), 1999.
- [13] **R. Polikar** "The story of wavelets" Rowan University, 1994.
- [14] **H-G. Stark** "Wavelets and signal processing" University of Applied Sciences, ISBN 3- 540-23433-0, Springer, Germany, 2005.
- [15] **M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.M. Poggi** " Wavelet Toolbox for use with MATLAB " by The MathWorks, 2002.

- [16] **Z.K. Peng, F.L. Chu** "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography" *Mechanical Systems and Signal Processing* journal. Vol.18, pp: 199–221, 2004.
- [17] **B. Tang, T. Song, F. Li, L. Deng** "Fault diagnosis for a wind turbine transmission system based on manifold learning and Shannon wavelet support vector machine" *Renewable Energy*, vol 62, pp:1-9, 2014.
- [18] **Merabet Saddek** « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écurueil par la méthode de reconnaissance des formes» *Mémoire d'ingénieur*, ENP 10 Avenue Hassan Badi, El-Harrach, Alger 2007.
- [19] **Hubert Razik et Gaëtan Didier** «notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone» *Groupe de recherches en électrotechnique et électrotechnique de Nancy G.R.E.E.N.-U.H.P.-U.M.R.-7037, Université Henri Poincaré-Nancy* 2003.
- [20] **Mechai.H et Mansour. L** « modélisations de la machine asynchrone en présence de défauts » *Mémoire d'ingénieur*, université de Msila 2006.
- [21] **Mechai.H et Mansour. L** « modélisations de la machine asynchrone en présence de défauts » *Mémoire d'ingénieur*, université de Msila 2006.
- [22] **V .Perrier** *Idée de la base Application de la théorie des ondelettes*, Laboratoire de Modélisation et Calcul de l'IMAG Institut National Polytechnique de Grenoble 2005.
- [23]. **M. Ayad, D. Chikouche** *Application de la transformée en ondelette à l'analyse des signaux vibratoires d'un système d'engrenage en vue d'un diagnostic précoce*, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007.
- [24]. **J. Demaeyer, M. Bebronne et S. Forthomme**, *Les Ondelettes:L'Analyse de Fourier* Département de physique faculté des sciences, printemps des sciences 2003.
- [25] **D.Gabor** "Theory of communication Part 1: The analysis of information" *Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering*, IEEE Journal of the Institution, Vol 93, N° 26 IEEE, pp: 429–441, 1946
- [26] **T. Genossar, M. Porat** "Can one evaluate the Gabor expansion using Gabor"s iterative algorithm" *IEEE Trans on signal processing*, Vol.40, No.8, pp: 1852-1861, 1992.
- [27] **A. Bouzida, O. Touhami, R. Ibtouen, A. Belouchrani, M. Fadel and A. Rezzoug**. *Fault Diagnosis in Industrial Induction Machines through Discrete Wavelet Transform*. 2010 IEEE.
- [28] **J. A. Daviu, M. Riera-Guasp, J. Roger-Folch, F. Martínez-Giménez, A. Peris**.

«Application and Optimization of the Discrete Wavelet Transform for the Detection of Broken Rotor Bars in Induction Machines », Applied and Computational Harmonics Analysis21, pp268–279,2006.

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

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

**[31]. G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, G. Iwanski,** «Doubly fed induction machine modeling and control for wind energy generation» Published by John Wiley & Sons ISBN 978-0-470-76865-5, 2011

# ANNEXES

---

## ANNEXE.1

Les paramètres et les caractéristiques, en vue de la simulation, du moteur asynchrone :

$L_s = 0,397$  H Inductance principale statorique

$L_r = 0,397$  H Inductance principale rotorique

$L_{ss} = 0,009594$  H Inductance de fuite statorique

$L_{rr} = 0,009594$  H Inductance de fuite rotorique

$M_{sr} = 0,3953$  H Inductance mutuelle stator-rotor

$L_{sc} = 1,5 * L_{sp} + |s|$  Inductance cyclique stator

$L_{rc} = 1,5 * L_{rp} + |r|$  Inductance cyclique rotor

$P = 1$  nombre de pair de pôle

$J_t = 0,023976$  Kg.m<sup>2</sup> Moment d'inertie de la machine

$R_s = 2,86$  Résistance statorique

$R_r = 2,756$  Résistance rotorique

$f_v = 0,0014439$  nm/rad/s frottement visqueux

La tension nominale 220/380 V

Abréviation :

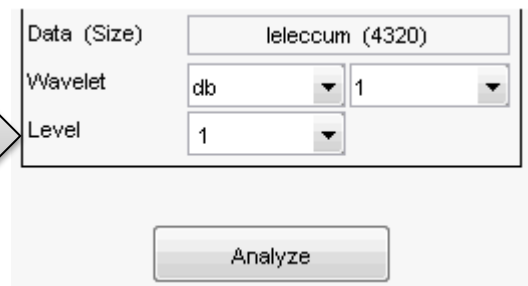
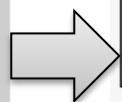
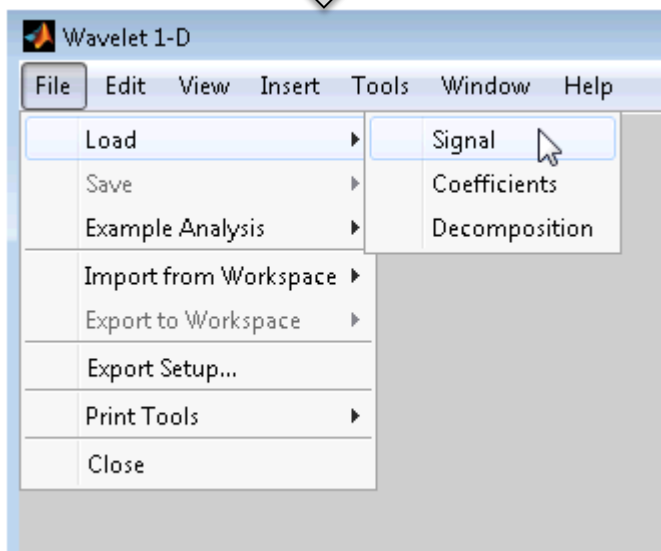
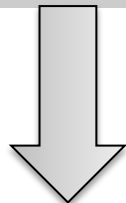
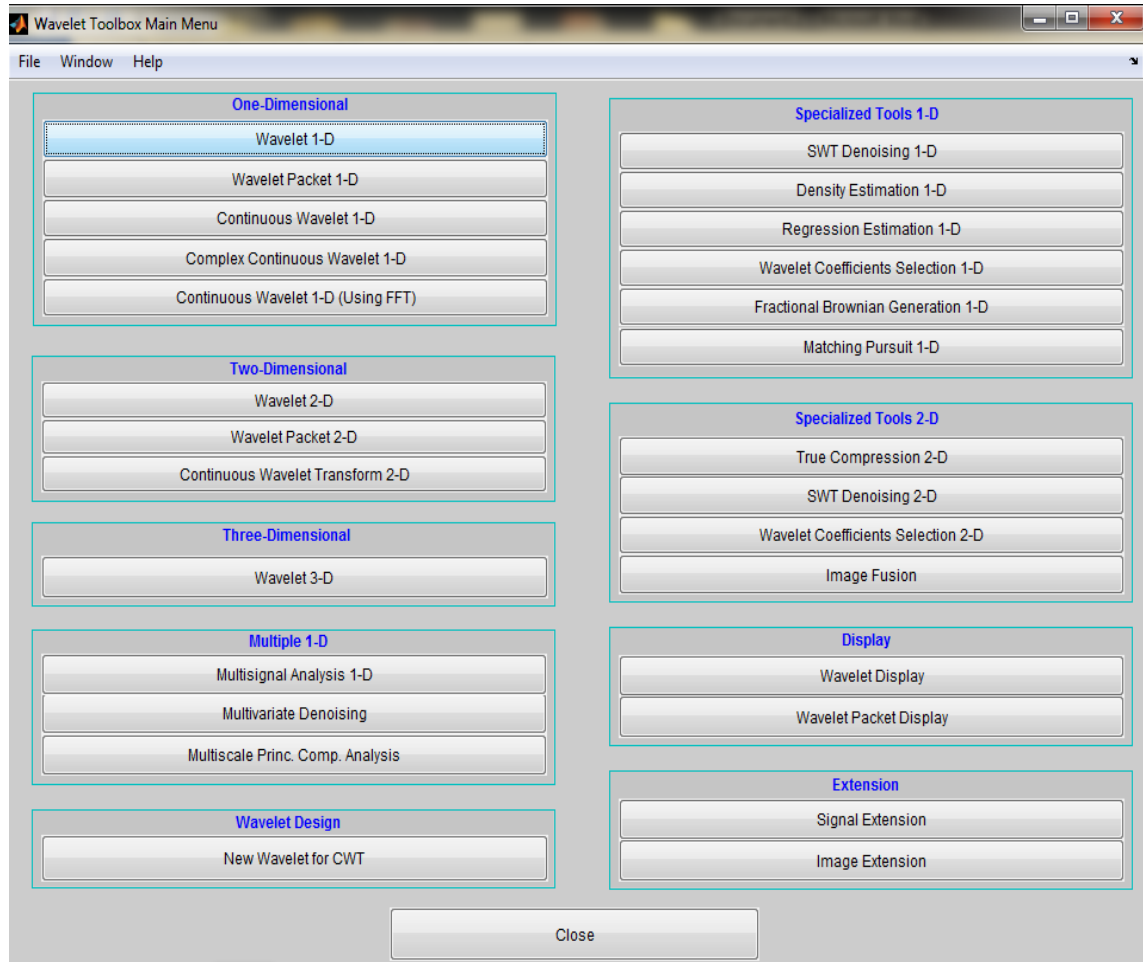
**MAS** : Machine Asynchrone.

**FFT** : Transformé de Fourier rapide ( Fast Fourier Transformation).

# ANNEXES

## ANNEXE.2

**wavemenu** : opens a menu for accessing the various graphical tools provided in the Wavelet Toolbox™ software



## ANNEXES

---

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

- Une fréquence d'échantillonnage de 10kHz ;
- 4s d'enregistrement qui donne un nombre total de 40000 points enregistrés ;

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

$$R = \frac{\text{fréquence d' échantillonnage}}{\text{Nomnbre de point}} = \frac{10000}{40000}$$

Donc : R=0.25