

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie



Département de Génie Electrique



Filière Electromécanique

Spécialité Maintenance Industrielle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en

Maintenance industrielle sous le thème :

**Stratégie de diagnostic d'une machine travaillant  
sous différentes conditions**

**Etudiants**

Mr Merzougui Kheireddine

Mr Goudjil Noureddine

**Encadré par**

Mr Imaouchen Yacine

2023/2024

# *Remercîment*

*Je tiens tout d'abord à remercier notre créateur DIEU de nous avoir donné la santé, la force et la volonté d'accomplir ce travail.*

*Nos vifs remerciements s'adressent à notre promoteur Mr IMAOUCHEN YACINE de nous avoir encadré, pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de l'année et pour l'aide qu'il nous a apporté*

*On remercie les membres de jury d'avoir bien voulu prendre le temps d'évaluer et d'examiner notre travail*

*Et on remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes très chers parents,  
à ma très chère sœur KAHINA adorés,  
qui ont toujours été présents pour moi, qui m'ont tout donné,  
qui m'ont soutenu et encouragé dans mes études,  
qu'ils puissent trouver ici l'expression de ma plus profonde  
gratitude,  
et que dieu les protègent.*

***Kheireddine***

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes très chers parents  
qui ont toujours été présents pour moi,  
qui m'ont tout donné,  
qui m'ont soutenu et encouragé dans mes études,  
qu'ils puissent trouver ici  
l'expression de ma plus profonde gratitude,  
et que dieu les protègent.*

*Noureddine*

# Sommaire

## Sommaire

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## Principal notation utilisées

## Introduction générale.....1

### Chapitre I : Stratégie de diagnostic des défauts d'une machine asynchrone

#### Introduction.....3

#### I.1. Moteur électrique asynchrone.....3

##### I.1.1. Constitution d'un Moteur Électrique (Éléments Fondamentaux) .....3

###### I. 1.1.1 Stator.....4

###### I. 1.1.2. Rotor .....5

#### I.2 Vibration des machines tournantes.....5

##### I.2.1. Les grandeurs pour mesurée une vibration mécanique.....6

###### I.2.1.1. Amplitude.....6

###### I.2.1.2. La fréquence.....6

#### I.3. Défaillances fréquentes .....7

##### I.3.1. Défaillances d'ordre électrique .....7

###### I.3.1.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques .....7

###### I.3.1.1.1. Ruptures de barres et des anneaux de la cage d'écureuil.....7

###### I.3.1.2. Défaillances des circuits électriques statorique .....8

###### I.3.1.2.1. Court-circuit entre spires et entre phases.....8

I.3.2. Défaillances d'ordre mécanique .....	9
I.3.2.1. Défaillances des roulements .....	9
I.3.2.2. Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd ».....	10
I.4. Chaîne d'acquisition .....	11
I.5. Techniques de diagnostique .....	12
I.5.1. Techniques d'analyse (surveillance) .....	11
I.5.1.1. L'analyse vibratoire.....	12
I.5.1.2. Analyse par mesure ultrasonore.....	12
I.5.1.3. L'analyse de courant, tension.....	13
I.6 Signal vibratoire .....	14
I.6.1. Objectifs du traitement de signal .....	14
I.6.2. Outils de traitement de signal vibratoire.....	15
I.6.2.1. Analyse temporelle .....	15
I.6.2.2. Analyse fréquentielle .....	15
I.6.2.3. Analyse Temps-Fréquence .....	15
I.7 Cas pratique : Mesures sur banc d'essai dédié à la détection des défauts au rotor.....	16
Conclusion.....	19

## **Chapitre II : Mesure de vibration pour la détection des défauts**

Introduction.....	20
II .1. Étude vibratoire des barres cassées dans les machines asynchrones.....	20
II .2 Résultats expérimentaux de la rupture de barres.....	20
II .2.1 Analyse des vibrations mesurées à 05 % de charge .....	21

II .2.1.1. Spectres de vibration.....	21
II .2.1.2. Interprétation des signaux .....	22
II .2.2 Analyse des vibrations mesurées à 10% de charge.....	22
II .2.2.1. Spectre de vibration.....	22
II .2.2.2. Interprétation des signaux .....	23
II .2.3 Analyse des vibrations mesurées à 15% de charge .....	24
II .2.3.1. Spectres de vibration.....	24
II .2.3.2. Interprétation des signaux .....	25
II .2.4 Analyse des vibrations mesurées à 20% de charge.....	25
II .2.4.1. Spectres de vibration.....	25
II .2.4.2. Interprétation des signaux.....	26
II .2.5 Analyse des vibrations mesurées à 25% de charge.....	27
II .1.5.1. Spectre de vibration.....	27
II .2.5.2. Interprétation des signaux.....	28
II .2.6 Analyse des vibrations mesurées à 30% de charge.....	28
II .2.6.1. Spectre de vibration.....	28
II .2.6.2. Interprétation des signaux .....	29
II .2.7 Analyse des vibrations mesurées à 35% de charge.....	30
II .2.7.1. Spectres de vibration.....	30
II .2.7.2. Interprétation des signaux .....	31
II .2.8 Analyse des vibrations mesurées à 40% de charge .....	31
II .2.8.1. Spectres de vibration.....	31

II .2.8.2. Interprétation des signaux.....	32
II .3. Récapitulatif des résultats.....	33
II .3.1. Tableau des amplitudes de vibration.....	33
II .3.2. Interprétation des résultats .....	34
Conclusion .....	35

### **Chapitre III : Mesure de tension pour la détection des défauts**

Introduction.....	36
III .1 Analyse de la tension pour le diagnostic de défaut des barres cassées au rotor.....	36
III .2 Résultats expérimentaux de la rupture de barres.....	36
III .2.1 Analyse des vibrations mesurées à 05 % de charge.....	37
III .2.1.1. Spectres de tension .....	37
III .2.1.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension.....	38
III .2.1.3. Interprétation des signaux .....	39
III .2.2 Analyse des vibrations mesurées à 10% de charge .....	39
III .2.2.1 Spectres de tension .....	39
III .2.2.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension.....	40
III .2.2.3. Interprétation des signaux.....	41
III .2.3 Analyse des vibrations mesurées à 15% de charge.....	42
III .2.3.1. Spectre de tension .....	42
III .2.3.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension .....	43
III .2.3.3. Interprétation des signaux .....	44
III .2.4 Analyse des vibrations mesurées à 20% de charge.....	45



III.2.4.1. Spectre de tension.....	45
III.2.4.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension .....	46
III.2.4.3. Interprétation des signaux .....	47
III.2.5 Analyse des vibrations mesurées à 25% de charge.....	48
III.2.5.1. Spectres de tension .....	48
III.2.5.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension.....	49
III.2.5.3. Interprétation des signaux .....	50
III.2.6 Analyse des vibrations mesurées à 30% de charge.....	50
III.2.6.1. Spectre de tension .....	50
III.2.6.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension .....	51
III.2.6.3. Interprétation des signaux .....	52
III.2.7 Analyse des vibrations mesurées à 35% de charge .....	53
III.2.7.1. Spectres de tension .....	53
III.2.7.2. Analyse du spectre d'enveloppe .....	54
III.2.7.3. Interprétation des signaux .....	55
III.2.8 Analyse des vibrations mesurées à 40% de charge .....	56
III.2.8.1. Spectres de tension .....	56
III.2.8.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension .....	57
III.1.8.3. Interprétation des signaux .....	58
III.3. Récapitulatif des résultats .....	59
Conclusion .....	60

## Chapitre IV : Mesure de courant pour la détection des défauts

Introduction.....	61
IV.1. Étude des barres cassées dans les machines asynchrones par l’analyse de courant.....	61
IV.2. Résultats expérimentaux de la rupture de barres.....	61
IV.2.1 Analyse des courants mesurés à 05% de charge.....	62
IV.2.1.1. Spectres du courant .....	62
IV.2.1.2. Spectres d’enveloppe du courant.....	63
IV. 2.1.3. Interprétation des signaux .....	64
IV.2.2 Analyse des courants mesurés à 10% de charge.....	64
IV.2.2.1. Spectre du courant .....	64
IV.2.2.2. Spectres d’enveloppe du courant .....	65
IV.2.2.3. Interprétation des signaux .....	66
IV.2.3. Analyse des courants mesurés à 15% de charge.....	67
IV.2.3.1. Spectre du courant.....	67
IV.2.3.2. Spectres d’enveloppe du courant.....	68
IV.2.3.3. Interprétation des signaux.....	69
IV.2.4. Analyse des courants mesurés à 20% de charge.....	70
IV.2.4.1. Spectre du courant .....	70
IV.2.4.2. Spectres d’enveloppe du courant .....	71
IV. 2.4.3. Interprétation des signaux .....	72
IV.2.5. Analyse des courants mesurés à 25% de charge.....	72
IV.2.5.1. Spectre du courant .....	72

IV.2.5.2. Spectres d'enveloppe du courant .....	73
IV.2.5.3. Interprétation des signaux .....	74
IV.2.6. Analyse des courants mesurés à 30% de charge.....	75
IV.2.6.1. Spectre du courant .....	75
IV.2.6.2. Spectres d'enveloppe du courant .....	76
IV.2.6.3. Interprétation des signaux .....	77
IV.2.7. Analyse des courants mesurés à 35% de charge.....	78
IV.2.7.1. Spectre du courant .....	78
IV.2.7.2. Spectres d'enveloppe du courant .....	79
IV.2.7.3. Interprétation des signaux .....	80
IV.2.8. Analyse des courants mesurés à 40% de charge.....	80
IV.2.8.1. Spectres du courant .....	80
IV.2.8.2. Spectres d'enveloppe du courant .....	81
IV.2.8.3. Interprétation des signaux .....	82
IV.3. Récapitulatif des résultats .....	83
Conclusion .....	84
Conclusion générale.....	85
Bibliographie.....	87

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I. 01</b> : Les éléments constituant une machine asynchrone	04
<b>Figure I.02</b> : Stator	04
<b>Figure I.03</b> : Rotor à cage d'écureuil	05
<b>Figure I.04</b> : l'amplitude et la fréquence	06
<b>Figure I.05</b> : Défaut d'une barre cassée / Rupture d'anneau de court-circuit	07
<b>Figure I.06</b> : Défauts des roulements à billes. (a) sur la bague interne; (b) sur la cage; (c) sur une bille et (d) sur la bague externe	10
<b>Figure I.07</b> : Balourd Statique / Dynamique	10
<b>Figure I.08</b> : schéma bloc de la chaîne d'acquisition et de traitement de signal	11
<b>Figure I.09</b> : analyse vibratoire	12
<b>Figure I.10</b> : Utilisation des ultrasonores, bruit	13
<b>Figure I.11</b> : l'analyse courant, tension	14
<b>Figure I.12</b> : Banc d'essai et système d'acquisition des données	17
<b>Figure I.13</b> : Rotor avec différentes barres cassées ou partiellement cassées	19

## Chapitre II

<b>Figure II. 01</b> : Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 05%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées	21
<b>Figure II. 02</b> : Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 10%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées	23
<b>Figure II. 03</b> : Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 15%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées	24

<p><b>Figure II. 04 :</b> Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées          (Charge à 20%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barre cassées          et <b>(e)</b> 4 barre cassées</p>	26
<p><b>Figure II. 05 :</b> Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées          (Charge à 25%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barre cassées          et <b>(e)</b> 4 barre cassées</p>	27
<p><b>Figure II. 06 :</b> Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées          (Charge à 30%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barre cassées          et <b>(e)</b> 4 barre cassées</p>	29
<p><b>Figure II. 07 :</b> Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées          (Charge à 35%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barre cassées          et <b>(e)</b> 4 barre cassées</p>	30
<p><b>Figure II. 08 :</b> Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées          (Charge à 40%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barre cassées          et <b>(e)</b> 4 barre cassées</p>	32
<p><b>Figure II.09:</b> Variation de l'amplitude de vibration à la fréquence du défaut pour          différentes charges en fonction du nombre de barres cassées</p>	34

### Chapitre III

<b>Figure III.01</b> : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 05%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	37
<b>Figure III.02</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 05%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	38
<b>Figure III.03</b> : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 10%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	40
<b>Figure III.04</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 10%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	41
<b>Figure III.05</b> : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 15%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	43
<b>Figure III.06</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 15%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	44
<b>Figure III.07</b> : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 20%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	45
<b>Figure III.08</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 20%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	46
<b>Figure III.09</b> : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 25%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	48
<b>Figure III.10</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 25%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	49

<b>Figure III.11</b> : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 30%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	51
<b>Figure III.12</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 30%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	52
<b>Figure III.13</b> : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 35%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	54
<b>Figure III.14</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 35%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	55
<b>Figure III.15</b> : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 40%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	57
<b>Figure III.16</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 40%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	58
<b>Figure III.17</b> : Variation de l'amplitude de tension à la fréquence démodulée du défaut ( $2gf_s$ ) pour différentes charges en fonction du nombre de barres cassées	59

## Chapitre IV

<b>Figure IV.01</b> : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 05%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	62
<b>Figure IV.02</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 5 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	63
<b>Figure IV.03</b> : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 10%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées	65

<b>Figure IV.04</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 10 %) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	66
<b>Figure IV.05</b> : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 15%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	68
<b>Figure IV.06</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 15 %) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	69
<b>Figure IV.07</b> : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 20%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	70
<b>Figure IV.08</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 20 %) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	71
<b>Figure IV.09</b> : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 25%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	73
<b>Figure IV.10</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 25 %) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	74
<b>Figure IV.11</b> : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 30%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	76
<b>Figure IV.12</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 30 %) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	77
<b>Figure IV.13</b> : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 35%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	78
<b>Figure IV.14</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 35 %) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	79



<b>Figure IV.15</b> : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 40%) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	81
<b>Figure IV.16</b> : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 40 %) : <b>(a)</b> sain, <b>(b)</b> 1 barre cassée, <b>(c)</b> 2 barres cassées, <b>(d)</b> 3 barres cassées et <b>(e)</b> 4 barres cassées	82
<b>Figure IV.17</b> : Variation de l'amplitude du courant à la fréquence démodulée du défaut ( $2gf_s$ ) pour différentes charges en fonction du nombre de barres cassées	84

## *Liste des tableaux*

### **Chapitre I**

<b>Tableau I.01</b> : Les causes des défauts rotoriques de la machine asynchrone.	08
<b>Tableau I.02</b> : Les causes des défauts statoriques de la machine asynchrone.	09

### **Chapitre II**

<b>Tableau II.01</b> : Tableau des amplitudes de vibration à différentes charges en fonction des barres cassées appliquer à la fréquence de défaut ~29 Hz	33
---	----

### **Chapitre III**

<b>Tableau III.01</b> : Tableau des amplitudes de tension à la fréquence du défaut ( $2gf_s$ ) obtenues par analyse d'enveloppe sous différentes charges et différents nombres de barres cassées	59
--	----

### **Chapitre IV**

<b>Tableau IV.01</b> : Tableau des amplitudes du courant des différentes charges en fonction des barres cassées à la fréquence ( $60+2gF_A$ ) Hz	83
--	----

## Notation, symboles, abréviation, et acronymes

### Abréviation et Acronymes

Ac	Amplitude crête
Acc	Amplitude crête à crête
$A_{\text{eff}}$	Amplitude efficace
ISO	International Organization for Standardization
MCSA	Motor Current Signature Analysis
MAS	Machine asynchrone
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
USP	Universidade de São Paulo
LAIPS	Laboratoire d'Automatisation Intelligente des Processus et des Systèmes
LACIME	Laboratoire d'Ingénierie Intelligente. Contrôle des Machines Électriques

### Notation et symboles

$g$	Glissement
$f_s$	Fréquence d'alimentation



---

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

Les moteurs asynchrones sont des composants essentiels dans nombreux systèmes industriels et commerciaux, jouant un rôle crucial dans divers processus de production et d'entraînement. La maintenance et le diagnostic précoces des défauts dans ces moteurs revêtent donc une importance capitale pour assurer leur bon fonctionnement et prévenir les pannes coûteuses. Parmi les défauts courants qui peuvent survenir dans les moteurs asynchrones, les barres cassées du rotor constituent l'un des problèmes les plus préoccupants en raison de leur impact sur la performance opérationnelle et la durabilité du moteur.

Pour diagnostiquer efficacement les barres cassées dans les moteurs asynchrones, diverses méthodes d'analyse ont été développées, chacune présentant ses propres avantages et inconvénients. Parmi ces méthodes, l'analyse vibratoire, l'analyse de tension et l'analyse de courant sont largement utilisées pour détecter les défauts et évaluer l'état de santé des moteurs.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur l'évaluation comparative de ces trois méthodes d'analyse pour la détection des barres cassées dans les moteurs asynchrones. Nous explorons les principes fondamentaux de chaque méthode, leurs applications pratiques et leurs performances dans des scénarios simulés. En combinant les résultats de ces analyses, nous cherchons à identifier les avantages et les limitations de chaque méthode, ainsi que les opportunités d'amélioration pour le diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones.

Dans cette étude comparative, notre objectif est de fournir des informations essentielles pour la maintenance et de la surveillance des moteurs asynchrones. En évaluant les performances de l'analyse vibratoire, de l'analyse de tension et de l'analyse de courant dans la détection des barres cassées, nous aspirons identifier les méthodes les plus fiables et les plus efficaces pour diagnostiquer ces défauts critiques. En mettant en évidence les forces et les faiblesses de chaque approche, ainsi que les opportunités d'amélioration, cette étude vise à éclairer les pratiques de maintenance prédictive et à renforcer la fiabilité des moteurs asynchrones dans divers contextes industriels.

Notre étude est organisée en quatre chapitres. Le premier chapitre pose le contexte en décrivant les composantes des moteurs asynchrones et les défauts fréquents, tandis que les chapitres suivants explorent respectivement l'analyse vibratoire, l'analyse de tension et l'analyse de courant comme méthodes diverses de diagnostic.

Après une comparaison approfondie des résultats, on finira par une conclusion qui déterminera la méthode la plus efficace pour le diagnostic des barres cassées dans les moteurs asynchrones, en tenant compte de critères tels que la sensibilité et la facilité d'interprétation des résultats.

---

# **CHAPITRE I**

## **Stratégie de diagnostic des défauts d'une machine asynchrone**



### Introduction

Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de son faible coût, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Nous présenterons dans ce chapitre un ensemble des notions de base concernant les activités de diagnostic. Tout d'abord, nous allons explorer les différents constituants de la machine, puis nous évoquerons essentiellement les divers défauts qui peuvent affectées ces constituants, ainsi que les méthodes et les techniques de diagnostic.

### I.1 Moteur électrique asynchrone

Le moteur asynchrone, également connu sous le nom de moteur à induction, est un type de moteur électrique répandu dans divers secteurs industriels et domestiques. Il transforme l'énergie électrique en mouvement mécanique en exploitant le principe de l'induction électromagnétique. Les bobines statoriques alimentées en courant alternatif produisent un champ magnétique rotatif, qui à son tour induit des courants électriques rotoriques. Ce processus génère un couple de rotation, propulsant l'arbre du moteur. Une caractéristique clé de ces moteurs est leur capacité à démarrer sous charge sans nécessiter de dispositif de démarrage externe, ce qui les rend très polyvalents et largement utilisés dans de nombreux contextes industriels. [1]

#### I.1.1. Constitution d'un Moteur Électrique (Éléments Fondamentaux)

Voici une description des principaux composants qui constituent un moteur électrique asynchrone **''Figure I. 01''** :

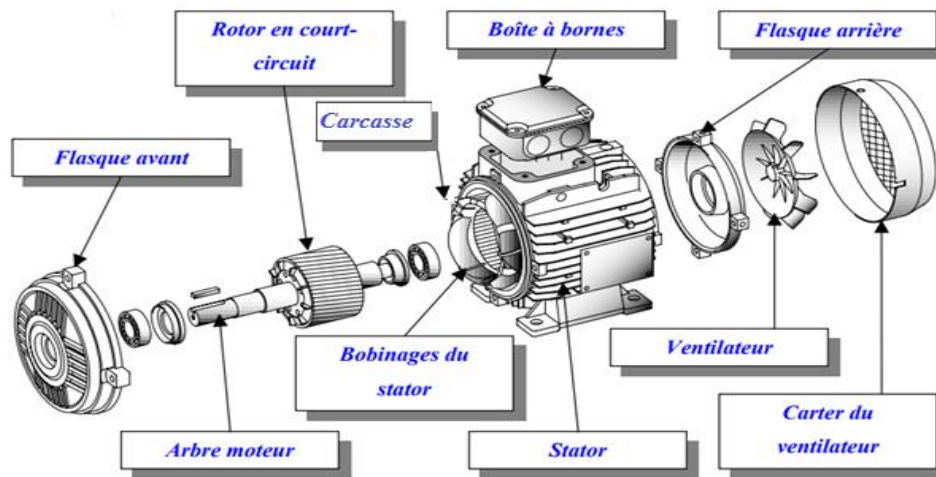


Figure I. 01 : Les éléments constituant une machine asynchrone [1]

### I.1.1.1. Stator

Le stator est la partie fixe du moteur et constitue le cadre statique de l'action magnétique, il est généralement composé de bobines enroulées autour d'un noyau de fer laminé. Ces bobines sont alimentées par le courant alternatif du réseau électrique, créant ainsi un champ magnétique fixe "Figure I.02". [2]

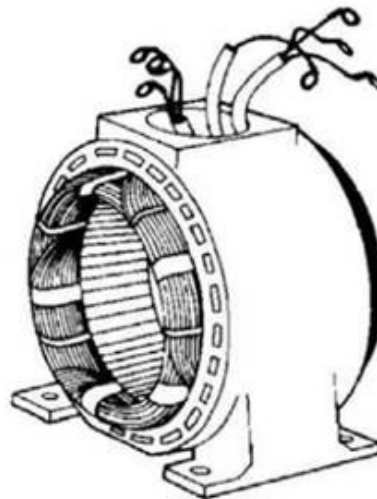
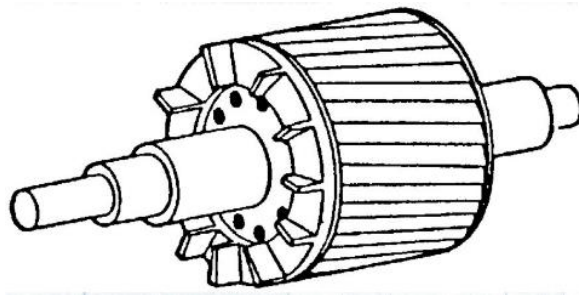


Figure I.02 : Stator [2]

### I.1.1.2. Rotor

Le rotor est la partie mobile du moteur. Il se compose d'un ensemble de conducteurs en cortège, généralement sous forme de barres, placés à l'intérieur d'un noyau en fer. Lorsque le courant circule dans le stator, il crée un champ magnétique tournant. Ce champ magnétique induit un courant dans le rotor, générant ainsi un couple électromagnétique qui met le rotor en rotation **''Figure I.03''**. [2]



**Figure I.03** : Rotor à cage d'écureuil [2]

## I.2 Vibration des machines tournantes

Les vibrations des machines tournantes est un phénomène crucial dans le domaine de la maintenance industrielle. Ces vibrations sont générées par le mouvement rotatif des équipements tels que les moteurs, les pompes, les compresseurs, et les turbines. Elles peuvent être causées par divers facteurs, tels que des déséquilibres, des défauts de roulement, des désalignements, ou des problèmes de lubrification. La surveillance des vibrations des machines tournantes est essentielle pour détecter les anomalies et prévenir les défaillances potentielles. Les capteurs de vibrations sont utilisés pour mesurer et analyser ces vibrations, permettant de diagnostiquer les problèmes et de planifier les interventions de maintenance nécessaires pour assurer le bon fonctionnement des équipements et prolonger leur durée de vie. [3]

### I.2.1. Les grandeurs pour mesurer une vibration mécanique

#### I.2.1.1. Amplitude

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir :

- L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête ( $A_c$ ) ou niveau crête.
- L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ( $A_{cc}$ ) niveau crête-crête.
- L'amplitude efficace ( $A_{eff}$ ), aussi appelée niveau efficace. [3]

#### I.2.1.2. La fréquence

La fréquence, désigne le nombre de répétitions d'un événement ou d'un phénomène périodique par unité de temps. En physique, elle est principalement utilisée pour caractériser des ondes, telles que les ondes sonores, électromagnétiques ou mécaniques, et est mesurée en hertz (Hz), correspondant à un cycle par seconde. La fréquence joue un rôle crucial dans divers domaines, notamment les télécommunications, où elle détermine les bandes de fréquences utilisées pour la transmission de données, ainsi que dans l'acoustique, l'électronique et la mécanique, où elle influence la performance et les caractéristiques des systèmes et des équipements. En résumé, la fréquence est une mesure essentielle pour analyser et comprendre les phénomènes oscillatoires et vibratoires dans de nombreuses applications technologiques et scientifiques. [3]

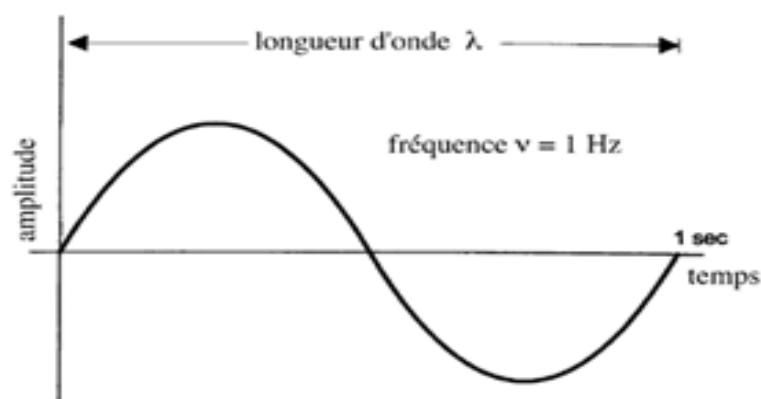


Figure I.04 : l'amplitude et la fréquence.

### I.3. Défaillances fréquentes

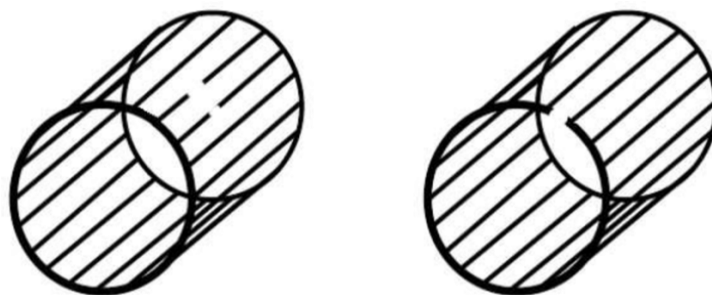
#### I.3.1. Défaillances d'ordre électrique

Les dysfonctionnements d'origine électrique ont le potentiel, dans certaines situations, de provoquer l'arrêt de la machine, de manière similaire aux défaillances d'ordre mécanique. Ces anomalies peuvent être classifiées en deux catégories bien définies, à savoir celles qui se produisent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui se manifestent au niveau des circuits électriques rotoriques.

##### I.3.1.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques

###### I.3.1.1.1. Ruptures de barres et des anneaux de la cage d'écureuil

Les ruptures de barres et des anneaux de la cage d'écureuil sont des défauts critiques dans les moteurs asynchrones. Ces ruptures peuvent être causées par divers facteurs tels que des contraintes mécaniques excessives, des défauts de fabrication ou une mauvaise conception. Lorsqu'elles se produisent, ces ruptures entraînent une diminution du couple de rotation, des vibrations excessives et une détérioration accélérée du moteur. La détection précoce de ces défauts est essentielle pour éviter des dommages plus importants et des temps d'arrêt prolongés.[4]



**Figure I.05** : Défaut d'une barre cassée / Rupture d'anneau de court-circuit [4].

**Tableau I.01** : Les causes des défauts rotoriques de la machine asynchrone. [6]

	<b>Défauts</b>	<b>Causes</b>
<b>Défauts rotoriques</b>	Défaut des roulements	Mauvais installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant, haute température ; manque de propreté, charge déséquilibrée.
	Rupture de barres	Déséquilibre magnétique, régime transitoire à longue durée, fatigue thermique.
	Défaut de circuit magnétique	Défaut de fabrication, fatigue thermique, surcharge.
	Désalignement des roulements	Défaut de couplage, surcharge, mauvais installation, jeu au niveau des paliers.
	Désalignement du rotor	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements.
	Roulement mal lubrifiés	Température excessive, mauvais qualité de lubrifiant.
	Déséquilibre mécanique	Mouvement des anneaux de court-circuit, problème d'alignement.

### **I.3.1.2. Défaillances des circuits électriques statorique**

#### **I.3.1.2.1. Court-circuit entre spires et entre phases**

Les courts-circuits entre spires et entre phases sont des défauts graves dans les systèmes électriques. Un court-circuit entre spires survient lorsque des spires adjacentes dans le bobinage entrent en contact, provoquant une déviation du courant normal et des surchauffes locales. Un court-circuit entre phases se produit lorsque deux phases conductrices entrent en contact, provoquant des courants élevés et des surcharges potentiellement dommageables pour les composants électriques. Ces défauts peuvent entraîner des dommages importants, des interruptions de service et même des risques d'incendie. Il est crucial de les détecter rapidement pour prévenir tout préjudice grave au système électrique. [4]

Tableau I.02 : Les causes des défauts statoriques de la machine asynchrone. [6]

	Défauts	Causes
<b>Défauts statoriques</b>	Vibration du support	Un déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, un déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvaises installations, un contact avec le rotor.
	Un défaut entre le stator et la carcasse	Ecrasements des spires par la carcasse, le cycle thermique, une abrasion de l'isolant, présence des points anguleux dans les encoches, un choc.
	Défaut d'isolation	Endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrage fréquent, condition de température ou d'humidité extrême.
	Court-circuit inter spires	Température excessive, humidité, vibration, surtension.
	Court-circuit inter phases	Défaut d'installation, haute température, alimentation déséquilibrée, contrainte de déformations au niveau des enroulements.
	Déplacement des conducteurs	Choc dû à un défaut, démarrage fréquent, vibration des têtes de bobines.
	Défaillance des connecteurs	Ecrasement des conducteurs, vibration excessive.

### I.3.2. Défaillances d'ordre mécanique

#### I.3.2.1. Défaillances des roulements

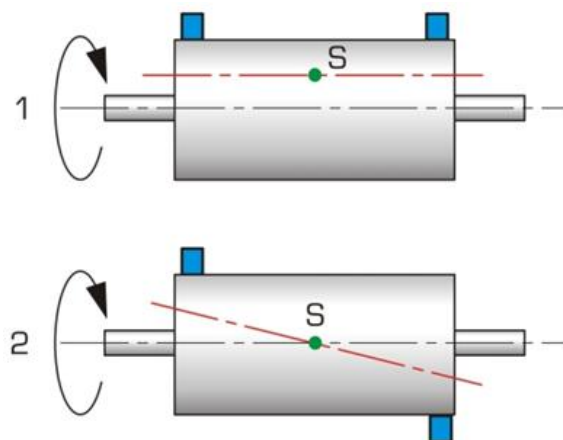
Les roulements à billes sont essentiels dans les machines électriques mais sujets à des défauts, souvent dus à un mauvais choix de matériau dès la fabrication. Ces défauts, tels que des dommages ou des fissures, peuvent entraîner des perturbations dans la rotation du roulement, affectant le bon fonctionnement de la machine. De plus, dans certaines situations, la graisse de lubrification peut se solidifier, provoquant une résistance à la rotation. La détection de ces défauts peut se faire par analyse vibratoire ou par analyse harmonique des courants statoriques. [4]



**Figure I.06 :** Défauts des roulements à billes. (a) sur la bague interne; (b) sur la cage; (c) sur une bille et (d) sur la bague externe. [5]

### I.3.2.2. Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd » :

Le défaut de balourd se produit lorsque la distribution de masse d'un composant rotatif n'est pas uniforme, ce qui entraîne des vibrations indésirables lorsqu'il tourne. Ces vibrations peuvent causer des dommages aux composants adjacents, réduire la durée de vie du système et entraîner une dégradation des performances. Il est essentiel de détecter et de corriger les défauts de balourd pour garantir le bon fonctionnement et la sécurité des équipements rotatifs. Il existe deux types de balourds : Statique et dynamique. [4]



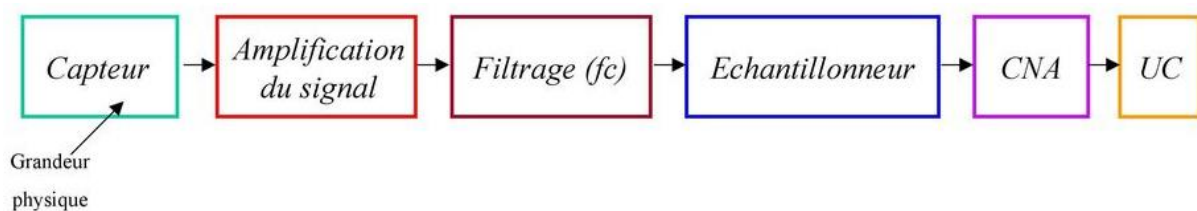
**Figure I.07 :** Balourd Statique / Dynamique



### I.4. Chaîne d'acquisition

Le principal objectif de la mesure est de transposer une grandeur physique à mesurer en une grandeur compatible avec le système d'acquisition de données. Actuellement, les signaux électriques sont largement préférés aux systèmes mécaniques. Ainsi, le capteur produit un signal initial, qui est ensuite amplifié et généralement converti en tension par un conditionneur. Ce processus simplifie considérablement le traitement des données pour le système d'acquisition, qui se trouve ainsi confronté à un courant électrique dont l'intensité est directement proportionnelle à l'amplitude du phénomène mesuré par le capteur, indépendamment de sa nature spécifique. . [7]

La chaîne d'acquisition est l'élément essentiel de toutes techniques. Elle permet de transformer un phénomène physique en un signal exploitable via le capteur. Son intérêt est d'améliorer le signal émis en un signal retravaillé pour faire ressortir ses caractéristiques. [7]



**Figure I.08** : schéma bloc de la chaîne d'acquisition et de traitement de signal.

### I.5. Techniques d'analyse (surveillance)

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse tels que [6] :

- la mesure de vibrations.
- l'analyse des mesures ultrasonores, bruit.
- L'analyse de courant et tension.

### I.5.1. L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines asynchrones. [6]



Figure I.09 : analyse vibratoire. [6]

### I.5.2. Analyse par mesure ultrasonore

Certains instruments ultrasonores détectent des émissions sonores de très hautes fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz, augmentant ainsi la pertinence des diagnostics. Les signaux sont convertis en fréquences audibles par hétérodynage, et la technique implique l'émission d'ondes ultrasonores puis la mesure du temps de réception des échos à l'aide d'un capteur piézoélectrique. En analyse du bruit, un changement peut indiquer une défaillance, et la mesure des vibrations selon la norme ISO 7849 (1987) aide à détecter des anomalies. Un stéthoscope, comprenant un casque et une sonde, permet de détecter les composants défectueux en écoutant les bruits de la machine dans une plage de fréquences de 30 à 15 000 Hz, en comparant subjectivement ces bruits avec des enregistrements de référence. [6]



**Figure I.10 :** Utilisation des ultrasonores, bruit. [6]

### **I.5.3. L'analyse de courant, tension**

L'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux, de par sa capacité à détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques et son pouvoir à être facilement accessible. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter pour chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace). [9]



**Figure I.11** : l'analyse courant, tension

### I.6 Signal vibratoire

Le signal est un phénomène physique dépendant du temps et d'autres variables transportant l'information utile à l'observateur.

Le traitement de signal est la discipline technique qui s'appuyant sur les ressources de l'électronique, de l'informatique et de la physique appliquée, pour l'élaboration ou l'interprétation des signaux, son champ d'application se situe donc dans tous les domaines concernés par la perception, la transmission ou l'exploitation des informations véhiculées par ces signaux. [8]

#### I.6.1. Objectifs du traitement de signal

Le traitement de signal a deux objectifs principaux :

- la manipulation des signaux, c-à-d. l'étude de leur transformation et les moyens qui permettent les transformations.
- Séparation des signaux utiles et des bruits ce qui comprend les techniques de détection, d'estimation et de classification. [8]

### **I.6.2. Outils de traitement de signal vibratoire**

#### **I.6.2.1. Analyse temporelle**

L'analyse temporelle des moteurs asynchrones consiste à examiner les variations temporelles de différentes grandeurs électriques et mécaniques pour surveiller les performances, détecter les anomalies et optimiser le fonctionnement. Cette analyse permet de suivre les courants, tensions, vitesses de rotation et couples moteurs pour identifier des problèmes tels que des déséquilibres de charge, des surchauffes, des variations de vitesse ou des dysfonctionnements. Elle utilise des outils comme les oscilloscopes et les enregistreurs de données pour capturer et analyser les signaux en temps réel, facilitant ainsi la maintenance préventive et l'amélioration de l'efficacité opérationnelle des moteurs.

#### **I.6.2.2. Analyse fréquentielle**

L'analyse fréquentielle des moteurs asynchrones consiste à étudier les composantes fréquentielles des signaux électriques et mécaniques pour diagnostiquer les performances et les anomalies du moteur. En décomposant les signaux en leurs fréquences constitutives à l'aide de techniques comme la transformée de Fourier, cette analyse permet d'identifier des phénomènes tels que les harmoniques, les vibrations, les déséquilibres et les défauts d'alignement. Les spectres de fréquence révèlent des informations cruciales sur l'état du moteur, facilitant la détection précoce de problèmes et l'optimisation de la maintenance. Des outils comme les analyseurs de spectre et les logiciels de traitement de signal sont utilisés pour effectuer cette analyse, contribuant à la fiabilité et à l'efficacité des moteurs asynchrones.

#### **I.6.2.3. Analyse Temps-Fréquence**

L'analyse temps-fréquence est une technique de traitement du signal qui vise à examiner comment les fréquences des composantes d'un signal varient dans le temps. Contrairement à l'analyse en fréquence traditionnelle, qui donne une représentation statique des composantes fréquentielles d'un signal, l'analyse temps-fréquence offre une perspective dynamique. Elle est particulièrement utile pour les signaux non stationnaires, dont les caractéristiques fréquentielles évoluent au fil du temps. L'une des méthodes les plus couramment utilisées pour l'analyse

temps-fréquence est la transformée de Fourier à court terme ou d'autres variantes telles que la transformée en ondelettes continue. [8]

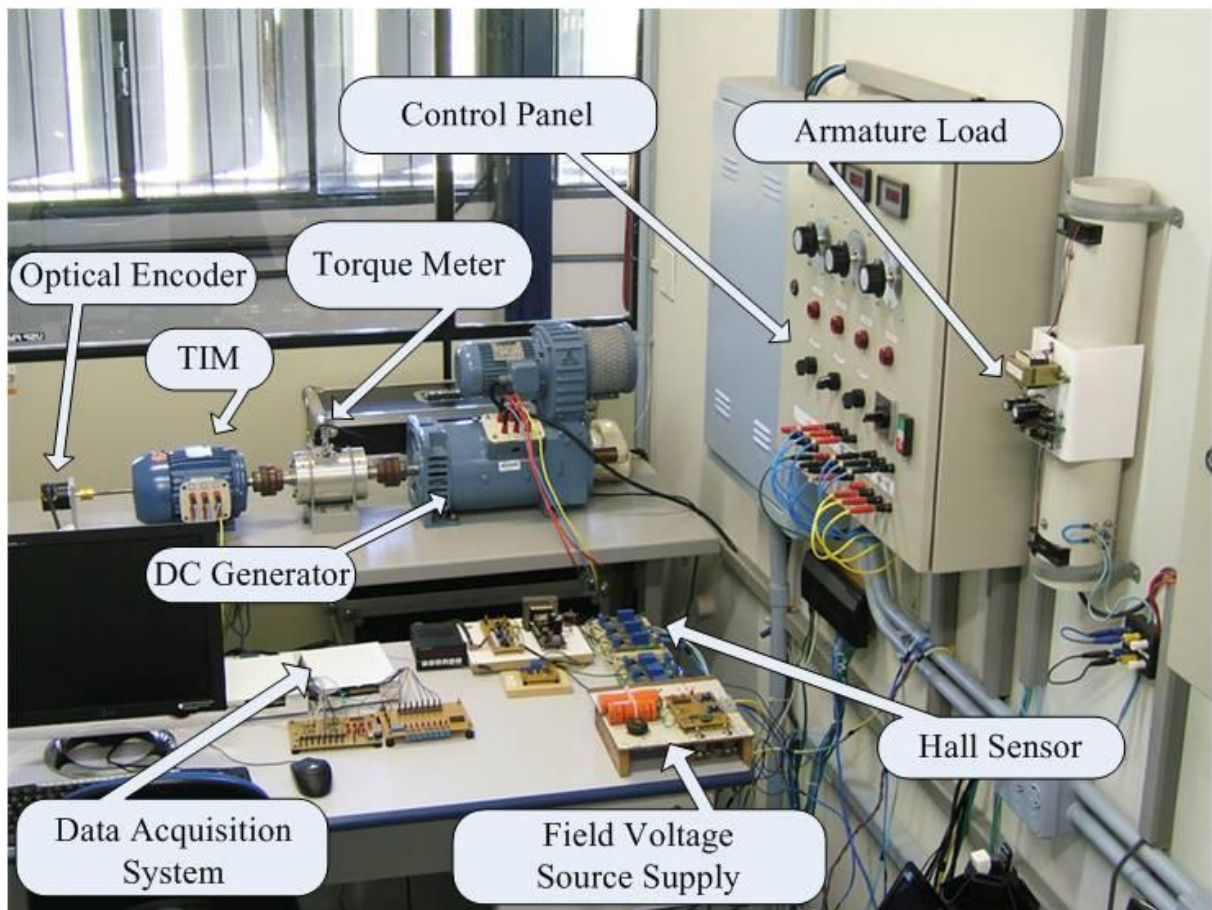
### **I.7 Cas pratique : Mesures sur Banc d'essai dédié à la détection des défauts au rotor**

Dans le cadre de notre travail, nous exploitons un ensemble de données de référence représentant différents cas d'état d'un moteur asynchrone triphasé. Ainsi, toute variation ou symptôme identifié ultérieurement dépendra du cas de fonctionnement normal de la machine. Pour notre étude spécifique, les résultats de tests préalablement réalisés sur la rupture d'une ou plusieurs barres cassées au rotor ont été exploités. De plus, ces barres ont été soumises à des charges variables allant de 5% à 40%. Chaque cas de rupture a fait l'objet d'une documentation afin d'établir une corrélation entre les niveaux de charge et les réponses observées. Les résultats ont été traités par analyse spectrale et analyse d'enveloppe [09].

Les composants principaux comprennent :

- Une machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil (MAS) ;
- Un freinage considéré comme une charge dynamique.

Le banc d'expériences se trouve dans les locaux de l'École d'Ingénierie de São Carlos (EESC) de l'Université de São Paulo (USP), Brésil, plus précisément dans le Laboratoire d'Automatisation Intelligente des Processus et des Systèmes (LAIPS) et le Laboratoire d'Ingénierie Intelligente. Contrôle des Machines Électriques (LACIME).



**Figure I.12** : Banc d'essai et système d'acquisition des données [09]

Le moteur asynchrone triphasé est un modèle de la gamme standard W22 du fabricant WEG, 1 cv, 220V / 380V, 3,02A / 1,75A, 4 pôles, 60 Hz, avec un couple nominal de 4,1 N.m et une vitesse nominale de 1715 tr/min. Le rotor est du type cage d'écureuil composé de 34 barres. Il est piloté au moyen d'un panneau de commande qui permet de sélectionner le type d'entraînement, étoile ou triangle, et le type d'alimentation, tension secteur continue ou via un onduleur triphasé.

La clé dynamométrique rotative utilisée dans la recherche est le modèle Transtec MT-103, avec une rotation maximale de 2000 tr/min, basée sur la technologie du pont de Wheatstone et avec une sensibilité de 2 mV/V. Sa fonction principale est de permettre la visualisation du couple présent dans l'arbre, qui variera en simulant diverses conditions de fonctionnement du moteur à induction.

Le réglage manuel du couple résistant se fait en faisant varier la tension de l'enroulement de champ du générateur de courant continu. Par conséquent, pour réduire l'amplitude de la tension du réseau, Variac utilise une variation de tension monophasée de 1 800 W, et pour

convertir la tension alternative en tension continue, un redresseur monophasé est utilisé pour alimenter l'enroulement de champ.

Les capteurs de vibrations utilisés étaient des accéléromètres uni-axiaux Vibro-control, modèle PU 2001, avec une sensibilité de 10 mV/mm/s, une plage de fréquence de 5 à 2000 Hz et un boîtier en acier inoxydable, qui fournit le signal d'accélération intégré dans le temps, c'est-à-dire fournit la mesure de la vitesse de vibration. Au total, cinq accéléromètres ont été utilisés simultanément, situés du côté non entraînement moteur, côté entraînement moteur, boîtier, dans la direction axiale du moteur et sur le bureau de support. Ces points de surveillance permettent donc de mesurer la vitesse axiale, tangentielle et radiale.

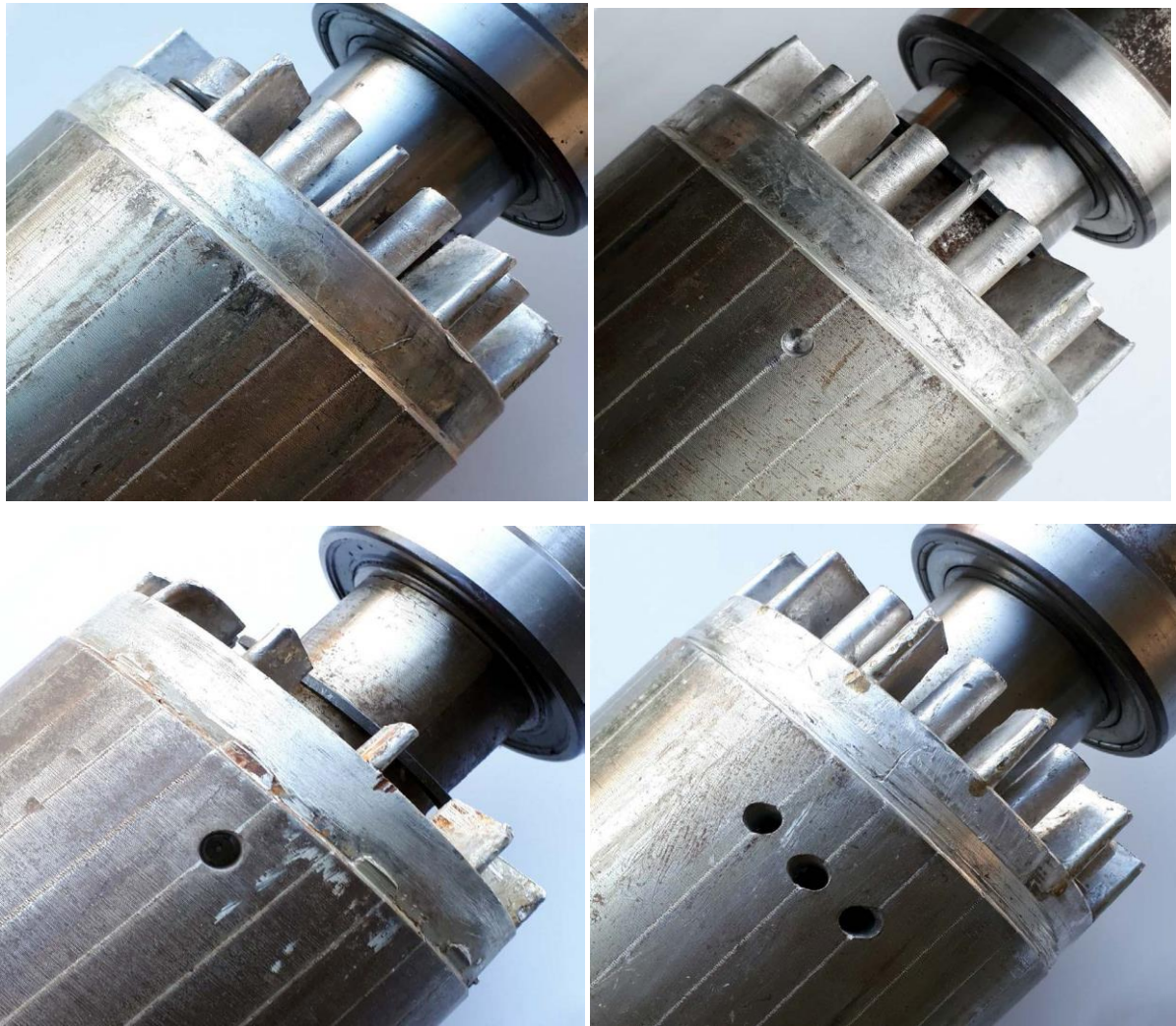
Les courants ont été mesurés à l'aide de sondes de courant alternatif, qui correspondent à des compteurs de précision, d'une capacité allant jusqu'à 50 A (valeur efficace), avec une tension de sortie de 10 mV/A, correspondant au modèle Yokogawa 96033. Les tensions ont été mesurées directement au MAS bornes utilisant des pointes de tension d'oscilloscope également du fabricant Yokogawa.

Pour simuler la rupture de barres cassées dans le rotor à cage d'écurie du moteur à induction triphasé, il a été nécessaire de percer le rotor. Le forage a été réalisé au moyen d'une perceuse d'établi montée avec un foret de 6 mm de diamètre pour s'assurer que le diamètre du trou dépasse la largeur d'une barre du rotor, la pointe étant centrée à la moitié de la longueur longitudinale du rotor.

Ainsi, un rotor sans trou a été testé dans un premier temps, c'est-à-dire un rotor sain, puis il a été successivement remplacé afin d'obtenir une base de données des variables surveillées.

Des expérimentations ont été réalisées en utilisant le banc mentionné ci-dessus pour la construction de la base de données. Les tests ont été effectués sur des moteurs sains et des moteurs présentant des défauts en démarrage direct avec tension d'alimentation triphasée équilibrée et fréquence de 60 Hz.





**Figure I.13 :** Rotor avec différentes barres cassées ou partiellement cassées [09]

### Conclusion

Les machines asynchrones, bien que robustes et économiques, peuvent présenter des défauts tels que des défaillances du stator, des problèmes de rotor, des déséquilibres électriques, et des défauts mécaniques comme les vibrations excessives. La détection précoce de ces défauts est cruciale et peut être réalisée par des méthodes de diagnostic telles que l'analyse des courants statoriques, l'analyse vibratoire, et l'analyse de tension

Des spectres de fréquence des signaux mesurés et leurs enveloppes sont calculés en utilisant le logiciel Matlab, ils sont affichés et discuté dans les prochains chapitres de ce mémoire.

---

# **CHAPITRE II**

**Mesure de vibration pour la détection des défauts**

### Introduction

Dans ce présent chapitre, nous aborderons l'analyse vibratoire, le diagnostic des défauts dans les barres de machines électriques est crucial pour assurer une maintenance préventive efficace et éviter les pannes coûteuses. Parmi les différentes méthodes de diagnostic, l'analyse vibratoire se distingue par sa capacité à détecter les anomalies mécaniques en observant les variations des signaux de vibration. Cette étude s'inscrit dans ce contexte en explorant l'efficacité de l'analyse vibratoire pour identifier les barres cassées sous différentes charges, allant de 5% à 40%.

Nous allons procéder à une analyse des mesures de vibrations correspondant à différentes conditions de charge et de défauts de barres cassées. Les amplitudes des signaux de vibration permettant d'évaluer la sensibilité de l'analyse spectrale aux changements structurels dans la machine étudiée.

### II.1. Étude vibratoire des barres cassées dans les machines asynchrones

L'analyse vibratoire, utilisant des techniques avancées comme la transformée de Fourier, permet de détecter précocement les barres cassées dans les moteurs asynchrones. On propose d'utiliser MATLAB comme outil puissant pour traiter et analyser les données vibratoires avec précision. En comparant les signaux vibratoires à une base de données représentant l'état normal du moteur, il est possible d'identifier les anomalies et de prendre des mesures préventives pour éviter des dommages plus graves et des arrêts prolongés. Cette approche contribue à une meilleure fiabilité des moteurs asynchrones et à une réduction des coûts de maintenance.

### II.2. Résultats expérimentaux de la rupture de barres

Les résultats expérimentaux seront présentés en suivant les conditions (barres cassées, charge). Les résultats sont présentés sous forme de figures qui montrent l'amplitude du signal en fonction des fréquences.

Les résultats obtenus à travers l'étude sur l'impact des cassures de barres d'un rotor à cage d'écureuil. Pour chaque niveau de barres cassées, nous observons les variations des amplitudes aux fréquences de défaut (~29 Hz).

## II.2.1 Analyse des vibrations mesurées à 05 % de charge

### II.2.1.1. Spectres de vibration

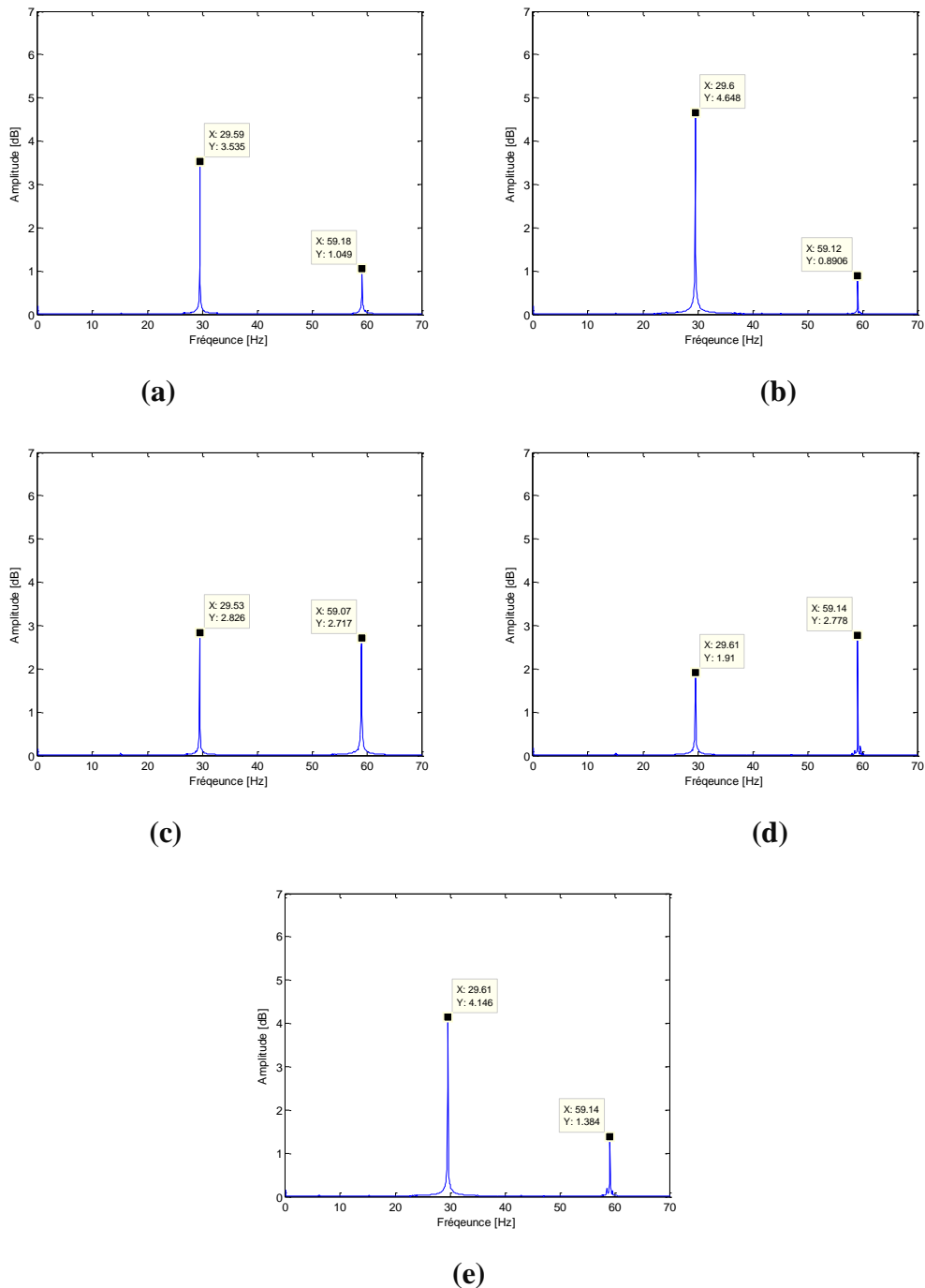


Figure II. 01 : Spectres de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 05%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

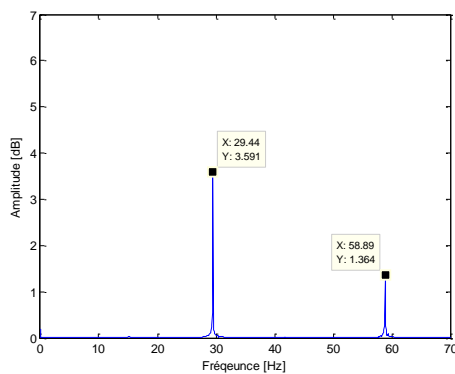
### II.2.1.2. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (bo) : Amplitude élevée de 3.5, reflétant un fonctionnement normal.
- Une barre cassée (b1) : Légère augmentation des irrégularités avec une amplitude de 4.6.
- Deux barres cassées (b2) : Amplitude légèrement plus basse de 2.8 avec des irrégularités accrues.
- Trois barres cassées (b3) : Amplitude plus basse de 1.9 avec des variations plus importantes.
- Quatre barres cassées (b4) : Signaux très irréguliers avec une amplitude élevée de 4.1.

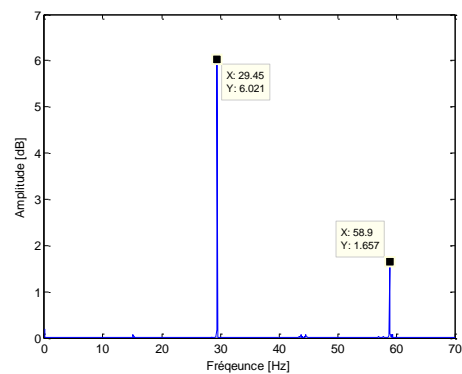
Ces résultats indiquent une complexité aléatoire des vibrations avec le nombre de barres cassées, bien que les valeurs à 29 Hz restent relativement stables.

## II.2.2 Analyse des vibrations mesurées à 10% de charge

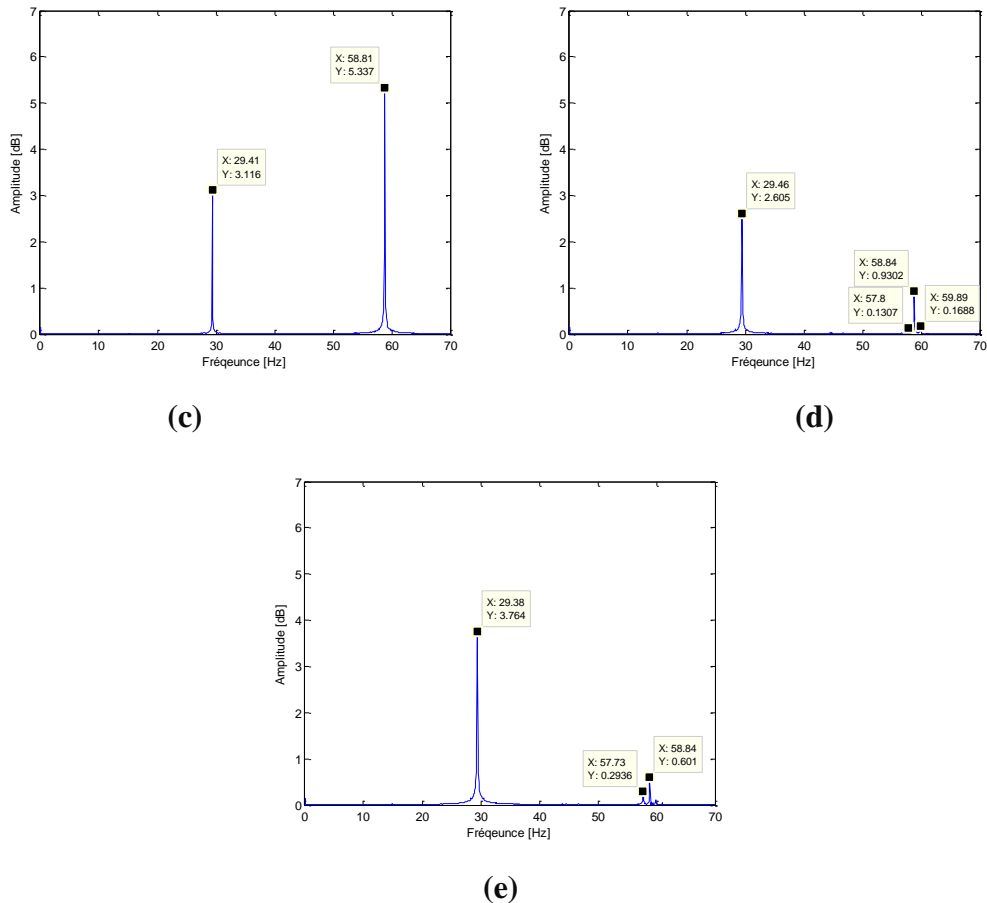
### II.2.2.1. Spectre de vibration



(a)



(b)



**Figure II.02 :** Spectre de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 10%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

### II.2.2.2. Interprétation des signaux

Sans barre cassée (bo) : Amplitude élevée de 3.5, indiquant un fonctionnement normal à cette charge.

- Une barre cassée (b1) : Amplitude plus élevée de 6 avec des irrégularités, mais pas de variations significatives à 29 Hz.
- Deux barres cassées (b2) : Amplitude légèrement plus basse de 3.1 avec des irrégularités accrues, mais pas de changements significatifs à 29 Hz.
- Trois barres cassées (b3) : Amplitude encore plus basse de 2.6 avec des variations plus importantes, mais pas de variations marquées à 29 Hz.
- Quatre barres cassées (b4) : Signaux irréguliers avec une amplitude élevée de 3.7, mais pas de variations significatives à 29 Hz.

Ces résultats montrent l'augmentation des amplitudes avec le nombre de barres cassées, bien que les valeurs à 29 Hz restent relativement stables.

### II.2.3 Analyse des vibrations mesurées à 15% de charge

#### II.2.3.1. Spectres de vibration

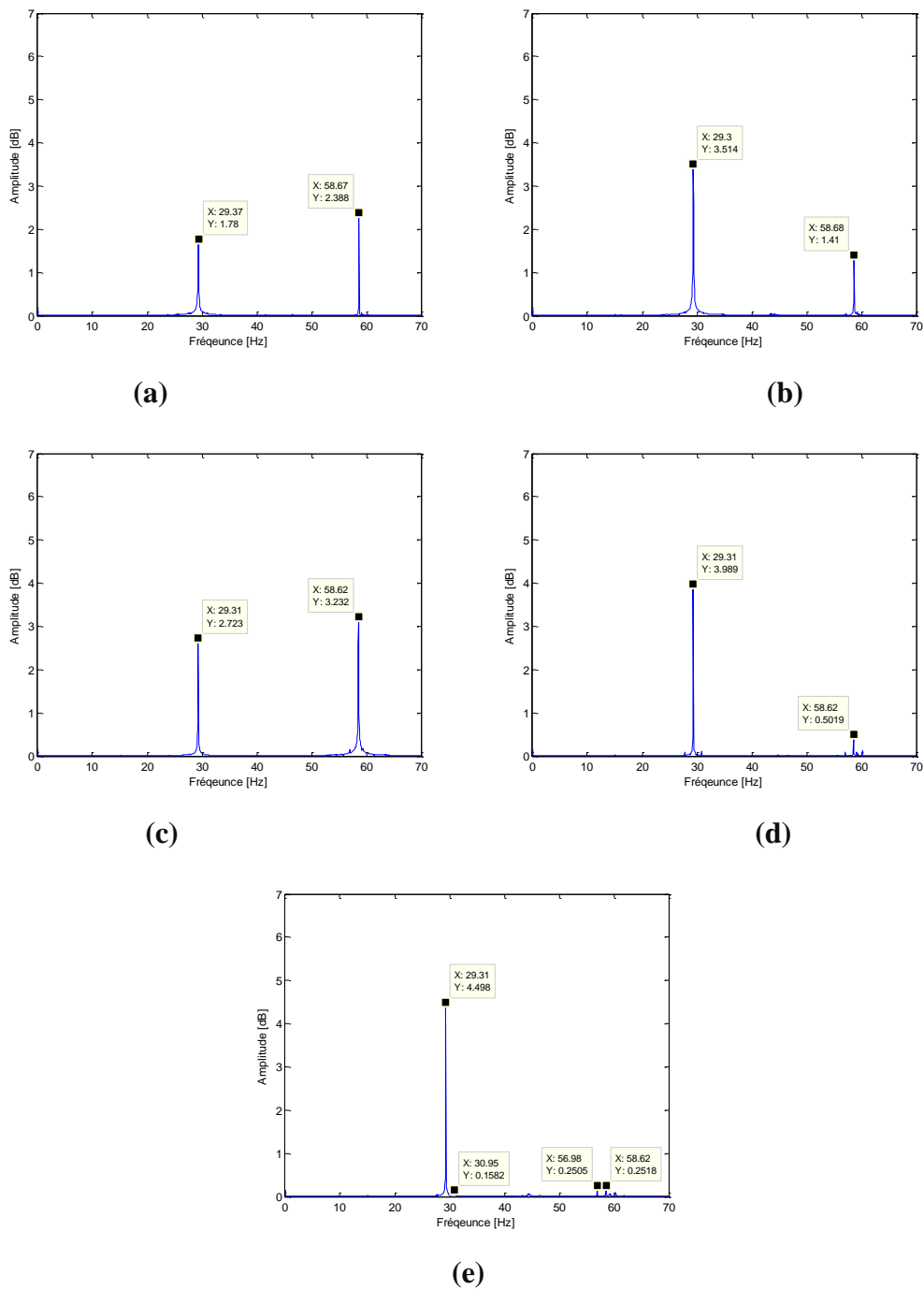


Figure II.03: Spectre de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 15%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

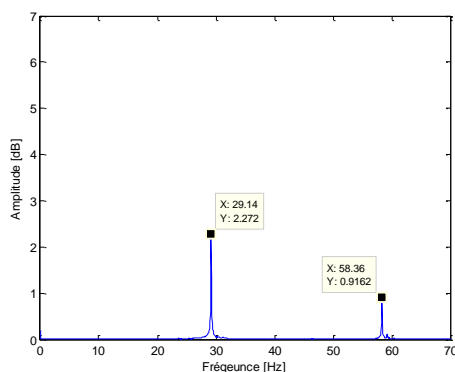
### II.2.3.2. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (Bo) : Amplitude basse de 1.78, indiquant une réponse vibratoire réduite à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Amplitude augmentée à 3.5 avec des irrégularités légèrement accrues.
- Deux barres cassées (B2) : Amplitude légèrement plus basse de 2.7 avec des irrégularités accrues, mais pas de changements significatifs à 29 Hz.
- Trois barres cassées (B3) : Amplitude augmentée à 3.9 avec des variations plus importantes, mais pas de variations marquées à 29 Hz.
- Quatre barres cassées (B4) : Signaux irréguliers avec une amplitude élevée de 4.4, mais pas de variations significatives à 29 Hz.

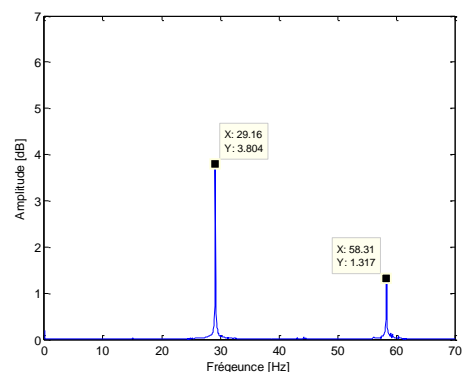
Ces résultats montrent une augmentation générale des amplitudes par rapport à la charge de 10%, mais avec des variations en fonction du nombre de barres cassées.

## II.2.4 Analyse des vibrations mesurées à 20% de charge

### II.2.4.1. Spectres de vibration

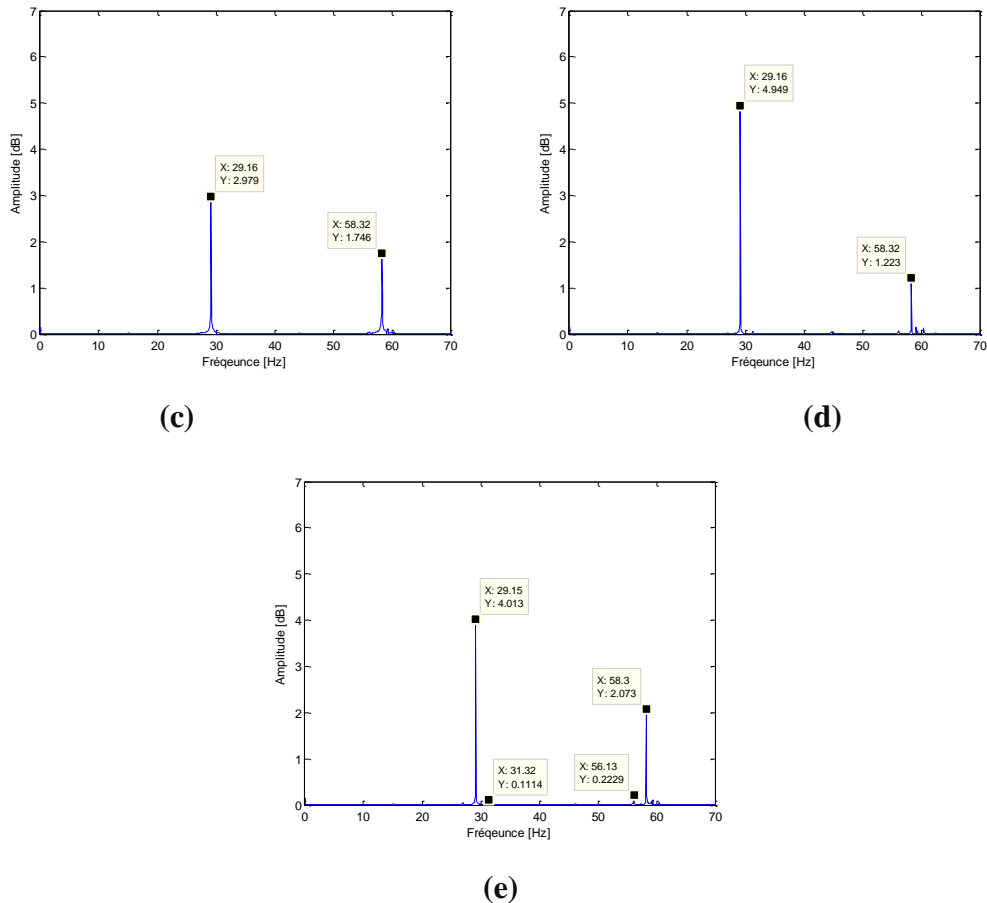


(a)



(b)





**Figure II.04 :** Spectre de vibration à différentes nombres de barres cassées (Charge à 20%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

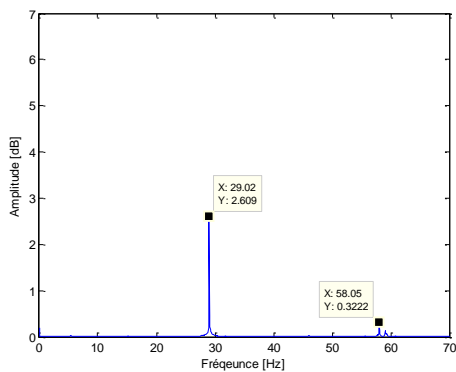
### II.2.4.2. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (Bo) : Amplitude de 2.27, montrant une réponse vibratoire relativement basse à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Amplitude augmentée à 3.8 avec des irrégularités légèrement accrues.
- Deux barres cassées (B2) : Amplitude légèrement plus basse de 2.9 avec des irrégularités accrues, mais pas de changements significatifs à 29 Hz.
- Trois barres cassées (B3) : Amplitude augmentée à 4.9 avec des variations plus importantes, mais pas de variations marquées à 29 Hz.
- Quatre barres cassées (B4) : Signaux irréguliers avec une amplitude élevée de 4.0, mais pas de variations significatives à 29 Hz.

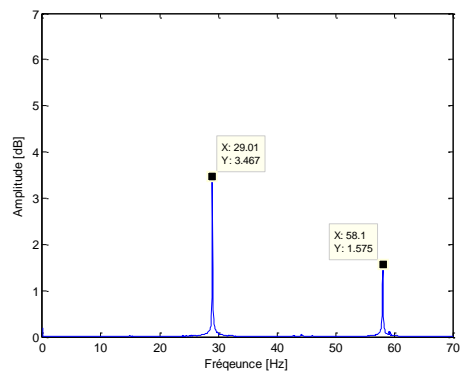
Ces résultats montrent une augmentation générale des amplitudes par rapport à la charge de 15%, mais avec des variations en fonction du nombre de barres cassées.

### II.2.5 Analyse des vibrations mesurées à 25% de charge

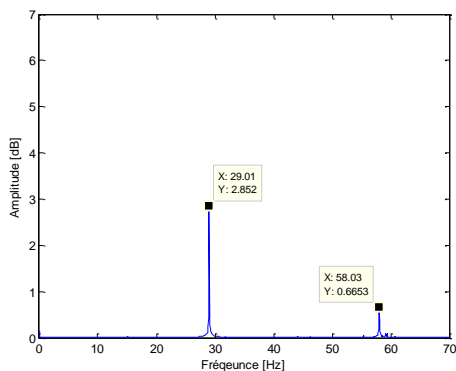
#### II.2.5.1. Spectre de vibration



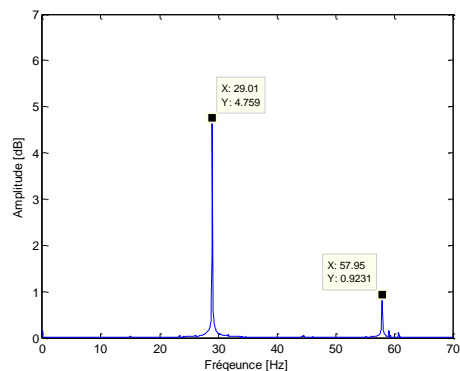
(a)



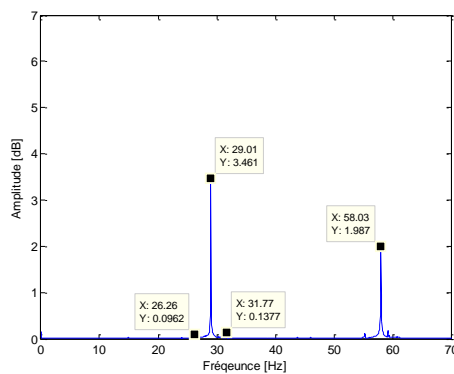
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure II.05 :** Spectre de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 25%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

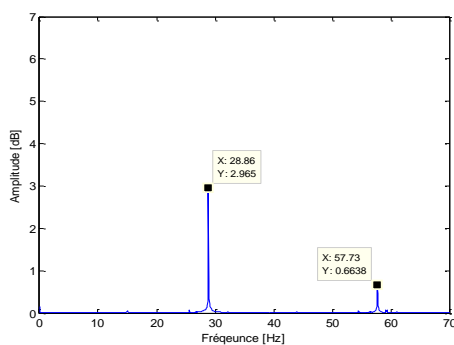
### II.2.5.2. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (Bo) : Amplitude de 2.6, indiquant une réponse vibratoire relativement modérée à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Amplitude légèrement augmentée à 3.4 avec des irrégularités légèrement accrues.
- Deux barres cassées (B2) : Amplitude légèrement plus basse de 2.8 avec des irrégularités accrues, mais pas de changements significatifs à 29 Hz.
- Trois barres cassées (B3) : Amplitude significativement augmentée à 4.7 avec des variations plus importantes, mais pas de variations marquées à 29 Hz.
- Quatre barres cassées (B4) : Amplitude légèrement diminuée à 3.4 avec des signaux irréguliers, mais pas de variations significatives à 29 Hz.

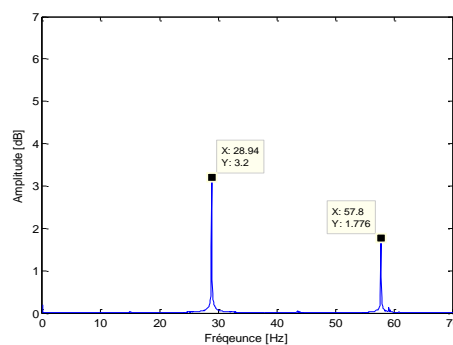
Ces résultats montrent une tendance à une augmentation des amplitudes par rapport à la charge de 20%, avec des variations en fonction du nombre de barres cassées.

## II.2.6 Analyse des vibrations mesurées à 30% de charge

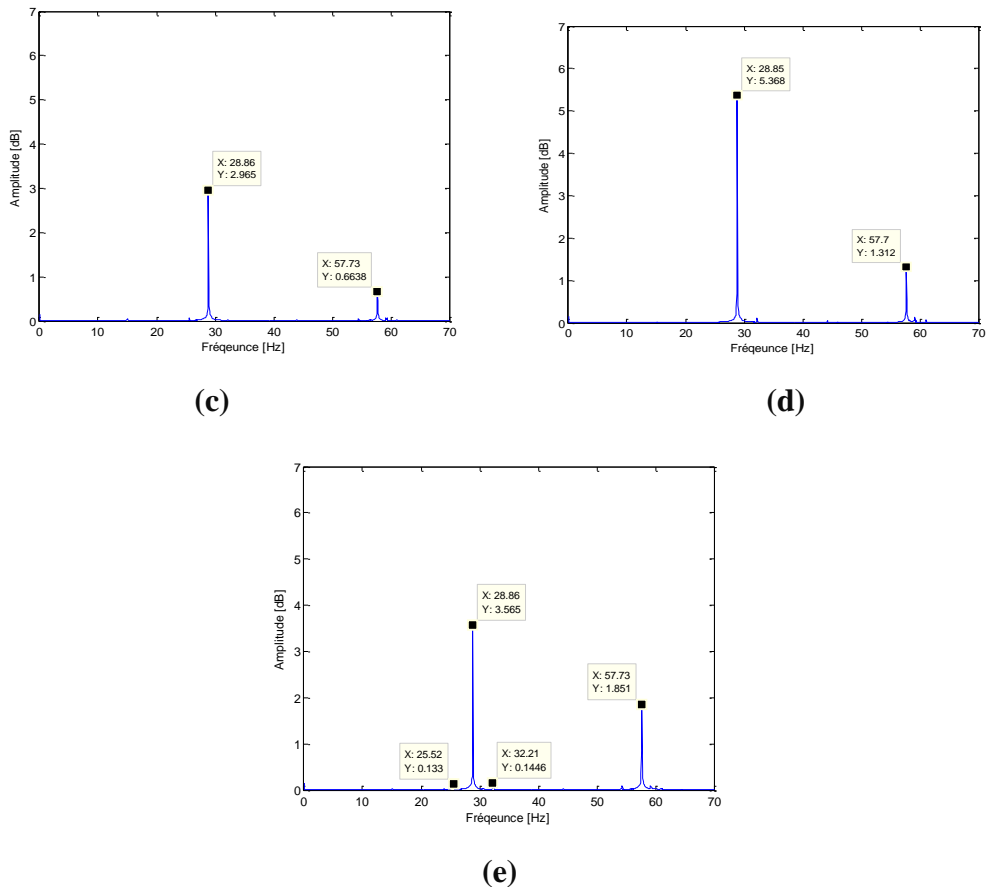
### II.2.6.1. Spectre de vibration



(a)



(b)



**Figure II.06 :** Spectre de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 30%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

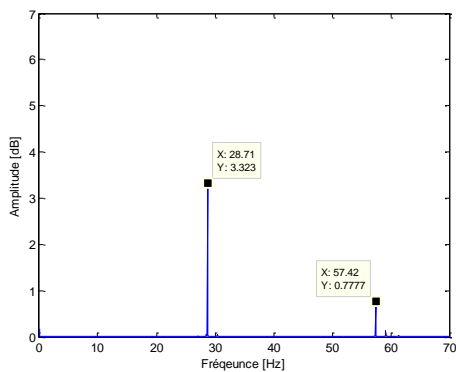
### II.2.6.2. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (Bo) : Amplitude de 2.4, indiquant une réponse vibratoire relativement modérée à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Amplitude légèrement augmentée à 3.2 avec des irrégularités légèrement accrues.
- Deux barres cassées (B2) : Amplitude légèrement plus basse de 2.9 avec des irrégularités accrues, mais pas de changements significatifs à 29 Hz.
- Trois barres cassées (B3) : Amplitude significativement augmentée à 5.3 avec des variations plus importantes, mais pas de variations marquées à 29 Hz.
- Quatre barres cassées (B4) : Amplitude légèrement diminuée à 3.5 avec des signaux irréguliers, mais pas de variations significatives à 29 Hz.

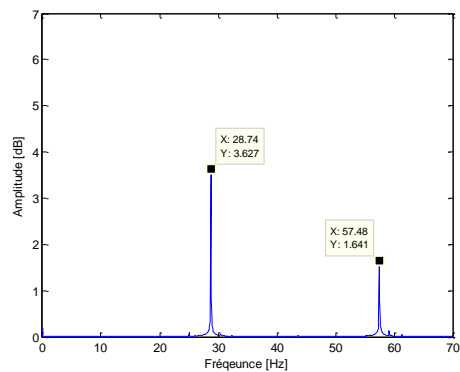
Ces résultats montrent une tendance à une augmentation des amplitudes par rapport à la charge de 25%, avec des variations en fonction du nombre de barres cassées.

### II.2.7 Analyse des vibrations mesurées à 35% de charge

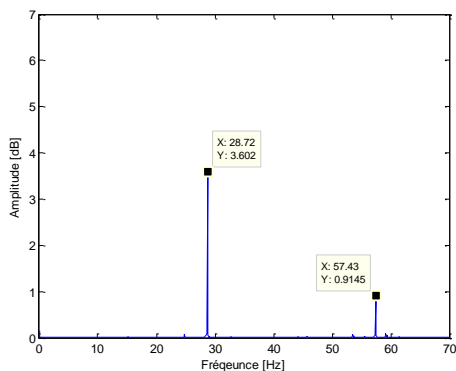
#### II.2.7.1. Spectres de vibration



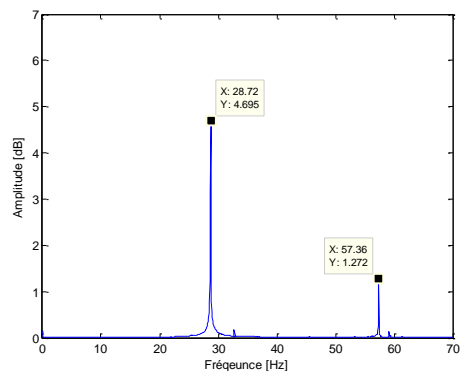
(a)



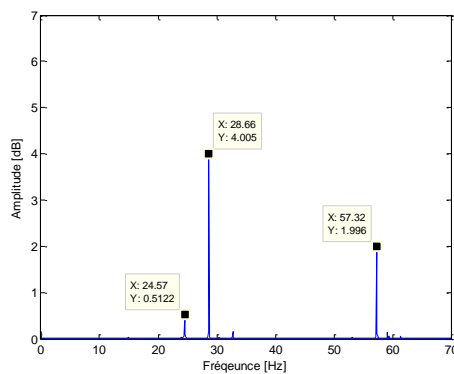
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure II.07** : Spectre de vibration à différents nombres de barres cassées (Charge à 35%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barre cassées

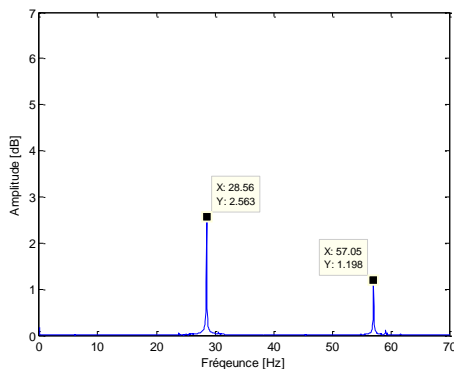
### II.2.7.2. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (B0) : Amplitude de 3.3, indiquant une réponse vibratoire modérée à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Amplitude légèrement augmentée à 3.6 avec des irrégularités légèrement accrues.
- Deux barres cassées (B2) : Amplitude légèrement augmentée à 3.6 avec des irrégularités accrues, mais pas de changements significatifs à 29 Hz.
- Trois barres cassées (B3) : Amplitude significativement augmentée à 4.6 avec des variations plus importantes, mais pas de variations marquées à 29 Hz.
- Quatre barres cassées (B4) : Amplitude légèrement diminuée à 4 avec des signaux irréguliers, mais pas de variations significatives à 29 Hz.

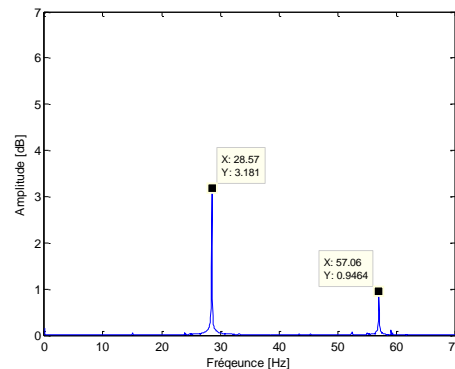
Ces résultats montrent une tendance à une augmentation des amplitudes par rapport à la charge de 30%, avec des variations en fonction du nombre de barres cassées.

## II.2.8 Analyse des vibrations mesurées à 40% de charge

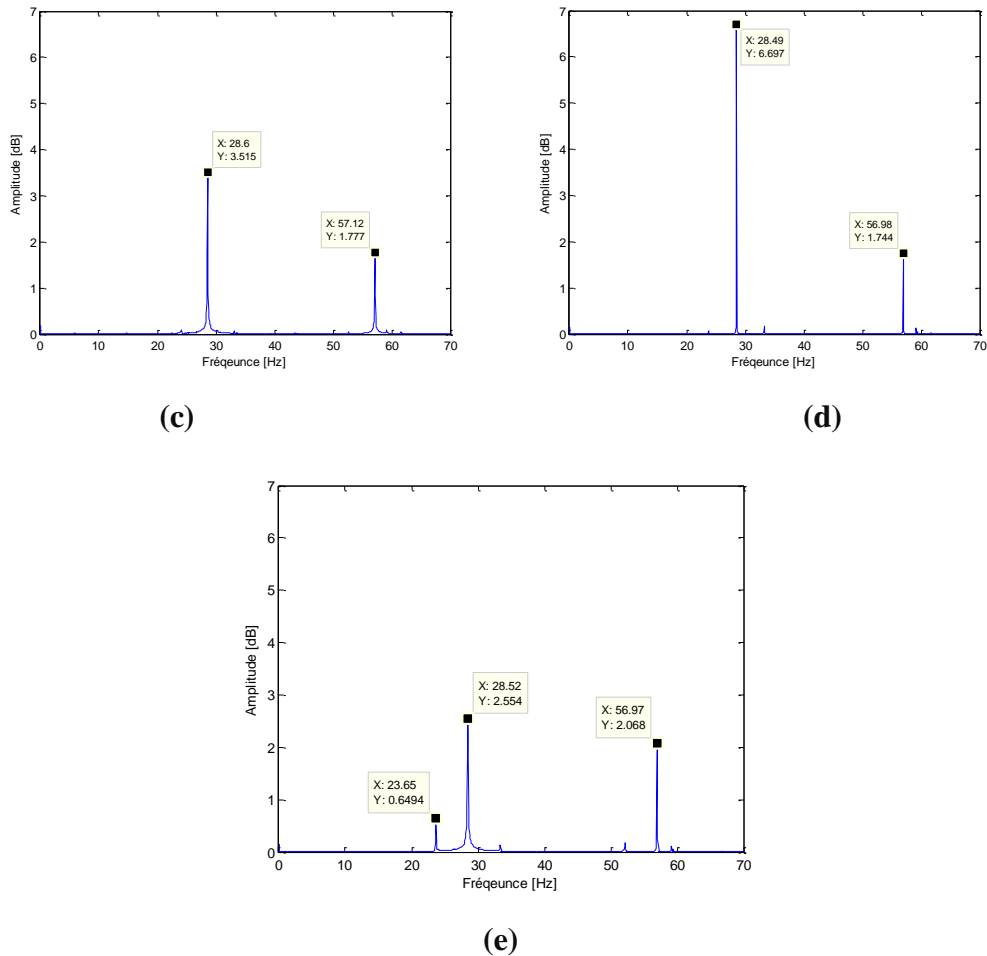
### II.2.8.1. Spectres de vibration



(a)



(b)



**Figure II.08 :** Spectre de vibration à différentes nombres de barres cassées (Charge à 40%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barre cassées

### II.2.8.2. Interprétation des signaux

Sans barre cassée (Bo) : Amplitude de 2.5, indiquant une réponse vibratoire modérée à cette charge.

- Une barre cassée (B1) : Amplitude légèrement augmentée à 3.1 avec des irrégularités légèrement accrues.
- Deux barres cassées (B2) : Amplitude augmentée à 3.5 avec des irrégularités accrues, mais pas de changements significatifs à 29 Hz.
- Trois barres cassées (B3) : Amplitude significativement augmentée à 6.69 avec des variations plus importantes, mais pas de variations marquées à 29 Hz.

- Quatre barres cassées (B4) : Amplitude restée à 2.5 avec des signaux irréguliers, mais pas de variations significatives à 29 Hz.

Ces résultats montrent une tendance à une augmentation des amplitudes par rapport à la charge de 35%, avec des variations en fonction du nombre de barres cassées.

### II.3. Récapitulatif des résultats

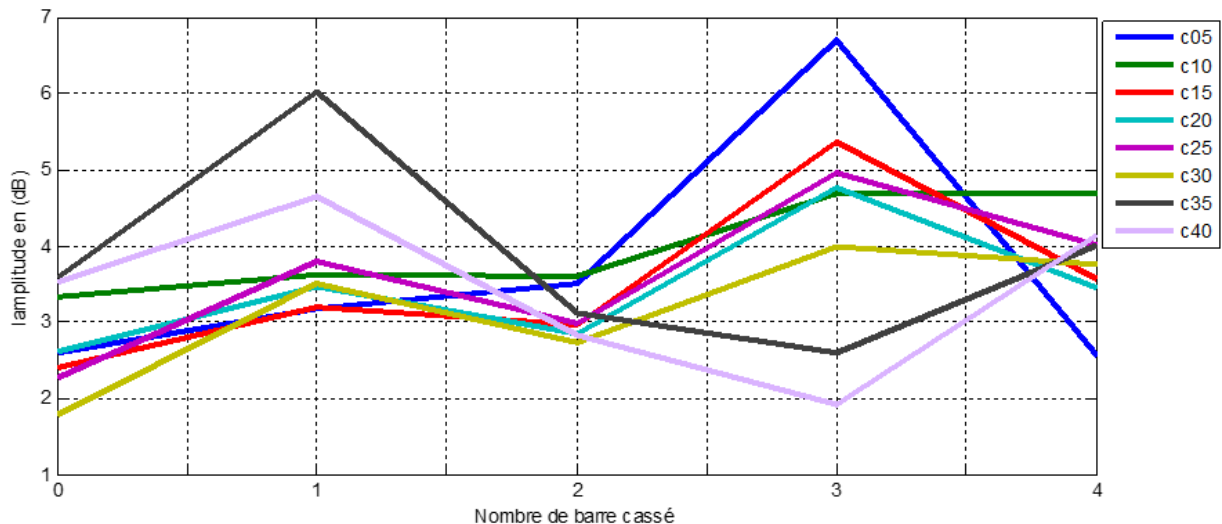
#### II.3.1. Tableau des amplitudes de vibration

Nous avons procédé à l'enregistrement des amplitudes de vibration à la fréquence de défaut sur un tableau, puis tracer ces données en fonction de la charge appliquée sous influence du nombre de barres cassées simulées. Cette approche permet d'analyser et de visualiser les comportements dynamiques et l'influence de la charge et de la sévérité du défaut sur la machine en termes de vibration, facilitant ainsi le diagnostic.

**Tableau II.01** : Tableau des amplitudes de vibration à différentes charges en fonction des barres cassées appliquées à la fréquence de défaut ~29 Hz

charge en %	40	35	30	25	20	15	10	5
b0	2,593	3,323	2.4	2,609	2,272	1,78	3,591	3,535
b1	3,181	3,627	3,2	3,467	3,804	3,514	6,021	4,648
b2	3,515	3,602	2,965	2,852	2,979	2,723	3,116	2,826
b3	6,697	4,695	5,368	4,759	4,949	3,989	2,605	1,91
b4	2,554	4,005	3,565	3,451	4,013	4,498	3,764	4,146





**Figure II.09:** Variation de l'amplitude de vibration à la fréquence du défaut pour différentes charges en fonction du nombre de barres cassées

### II.3.2. Interprétation des résultats

Le graphique dans la **Figure II.09** généré à partir des résultats du **Tableau II.01** précédent indique que les amplitudes vibratoires à la fréquence de défaut (~29 Hz) ne suivent pas une tendance linéaire, l'analyse des amplitudes des vibrations en fonction des charges (de 5% à 40%) et du nombre de barres cassées (de 0 à 4) révèle des tendances infimes dans le comportement du système. Dans l'ensemble, nous observons une augmentation progressive des amplitudes avec l'augmentation de la charge, ce qui indique une réponse vibratoire plus forte à des charges plus élevées. Cependant, cette augmentation n'est pas linéaire et varie aléatoirement en fonction du nombre de barres cassées.

Les courbes de vibrations donnent des informations limitées sur l'existence du défaut de la cassure des barres. Nous avons remarqué que les signaux n'ont pas une amplitude remarquable. D'après l'analyse des fréquences caractéristiques du défaut de la rupture de barres, nous amenons à une difficulté sérieuse dans plusieurs parties pour étudier l'existence du défaut de la cassure de barre. La détection de ce défaut nécessite souvent un zoom puissant capable de faire ressortir la fréquence de défauts, qui peut être très faible.

Les amplitudes des signaux varient de manière aléatoire en fonction de la charge et du nombre de barres cassées, ce qui rend difficile une interprétation précise et cohérente. Malgré cette variabilité, nous observons une tendance générale à une augmentation des amplitudes avec l'augmentation de la charge. Cependant, cette augmentation n'est pas uniforme et peut varier

considérablement d'un signal à l'autre, ce qui suggère une réponse vibratoire complexe et non déterministe du système.

### **Conclusion**

L'analyse des amplitudes des signaux vibratoires à la fréquence de défaut de barres cassées au rotor montre une variabilité importante, ce qui rend difficile une interprétation précise et fiable. Cette variabilité peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment des fluctuations aléatoires dans les conditions opérationnelles du système, des imperfections dans les capteurs de mesure ou des erreurs expérimentales. En raison de cette variabilité, il est difficile de tirer des conclusions définitives sur le comportement vibratoire du système en fonction de la charge et du nombre de barres cassées uniquement à partir des signaux de vibration. Il pourrait être nécessaire d'explorer d'autres approches d'analyse ou d'investigation pour obtenir des informations plus précises sur l'intégrité structurelle du système.

---

# **CHAPITRE III**

**Mesure de tension pour la détection des défauts**

### Introduction

L'analyse de la tension est une technique de diagnostic essentielle pour surveiller l'état des machines électriques, notamment les moteurs asynchrones. Cette méthode consiste à examiner les variations de tension pour identifier des anomalies de fonctionnement, telles que les cassures de barres de rotor, qui peuvent compromettre les performances de la machine et entraîner des défaillances. Dans notre étude, nous nous appuyerons sur une base de données préalablement extraite d'une recherche antérieure et présentées au premier chapitre. Nous examinons ces mesures par analyse spectrale et analyse d'enveloppe afin de mieux comprendre l'influence des cassures de barres rotoriques sur la tension. Cette approche nous permettra de valider l'efficacité de l'analyse de la tension comme outil de diagnostic, en exploitant des données réelles pour développer des modèles prédictifs précis. Cette approche devra améliorer la fiabilité des moteurs asynchrones et de réduire les coûts de maintenance.

### III.1 Analyse de la tension pour le diagnostic de défaut des Barres Cassées au rotor

Les défauts dans les moteurs asynchrones, tels que les barres cassées, peuvent engendrer des perturbations électriques. L'analyse de la tension permet d'identifier ces anomalies et de diagnostiquer les défaillances.

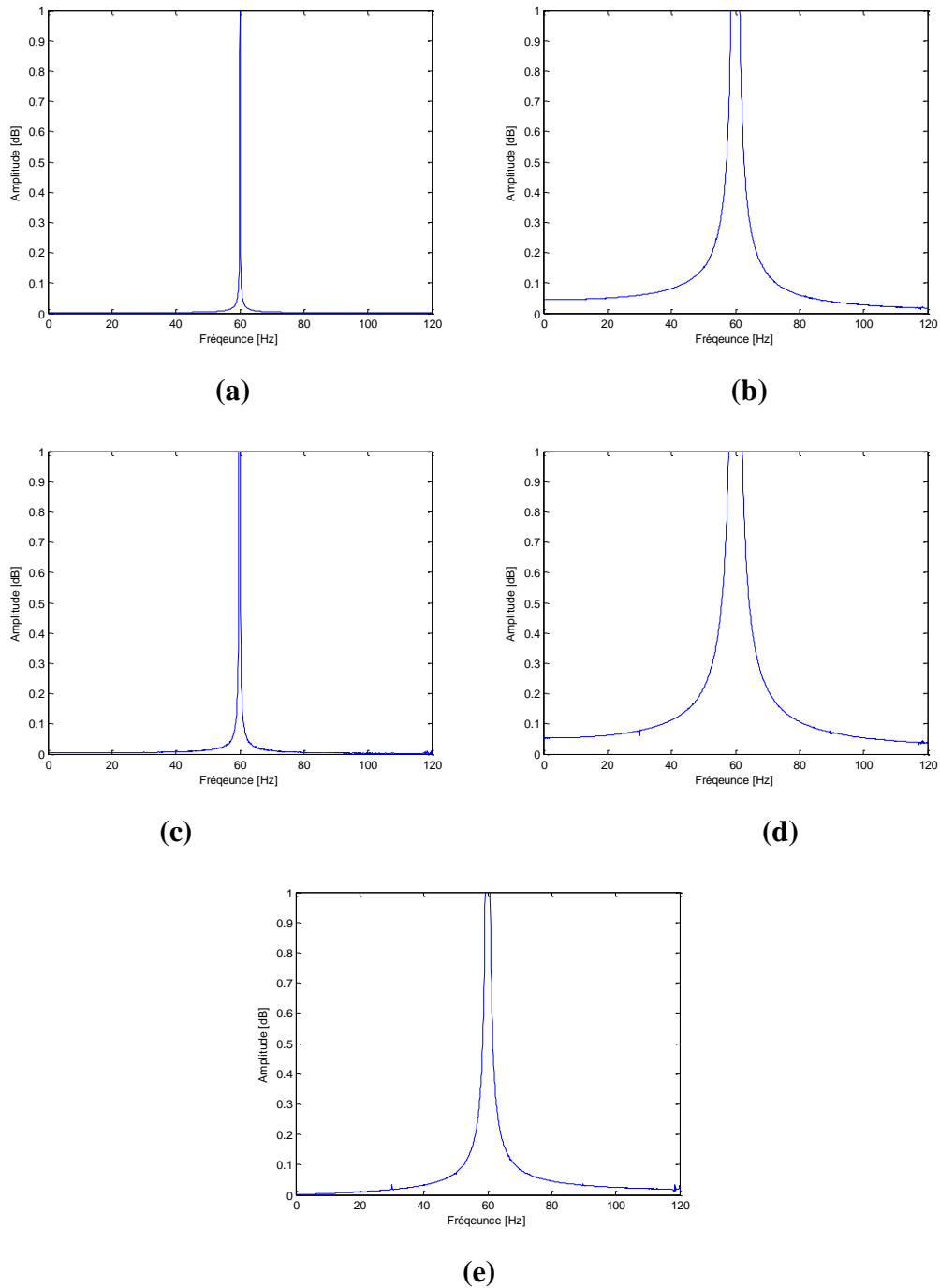
La transformée de Fourier révèle les fréquences spécifiques liées aux barres cassées, tandis que l'analyse d'enveloppe (Hilbert) permet de démoduler les signaux de tension et de mettre en lumière les fluctuations des composantes associées à ces défauts. Ce procédé devra offrir une détection meilleure. L'analyse des signaux de tension via la transformée de Fourier, va contribuer ainsi au développement des stratégies de maintenance proactive basées sur une analyse approfondie des variations de tension.

### III.2 Résultats expérimentaux de la rupture de barres

Les résultats expérimentaux seront présentés en tenant compte des conditions de barres cassées et de la charge. Les données seront illustrées par des figures montrant l'amplitude du signal de tension en fonction des fréquences. L'étude examine l'impact des cassures de barres dans un rotor à cage d'écureuil. Pour chaque niveau de barres cassées, nous observerons les variations d'amplitude aux fréquences de défaut  $(1 \pm 2g)f_s$  où  $f_s$  est la fréquence d'alimentation (60 Hz) et  $g$  représente le glissement qui dépend de la vitesse de rotation.

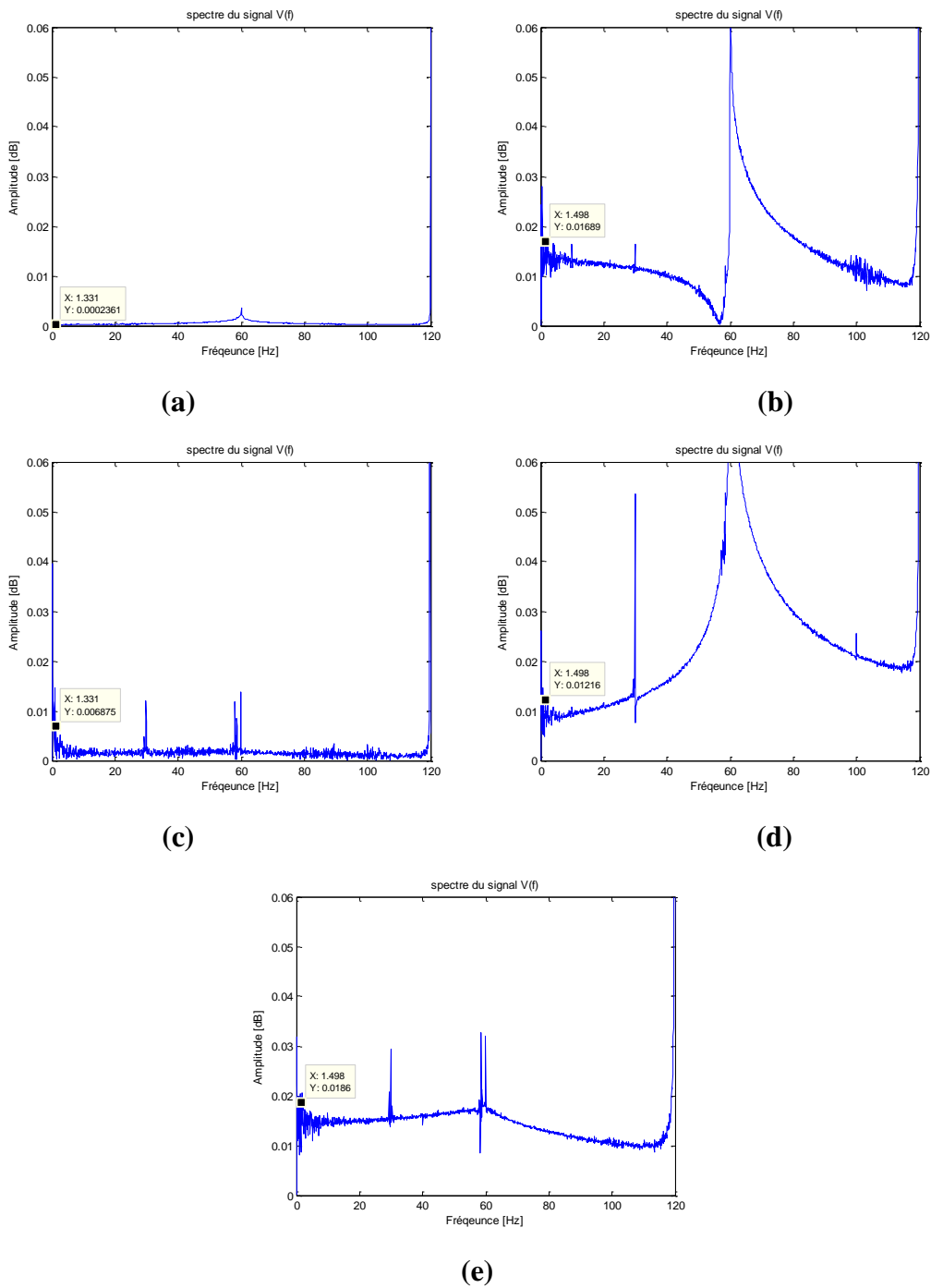
### III.2.1 Analyse des tensions mesurées à 05 % de charge

#### III.2.1.1. Spectres de tension



**Figure III.01** : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 05%) :  
(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### III.2.1.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension



**Figure III.02** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 05%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

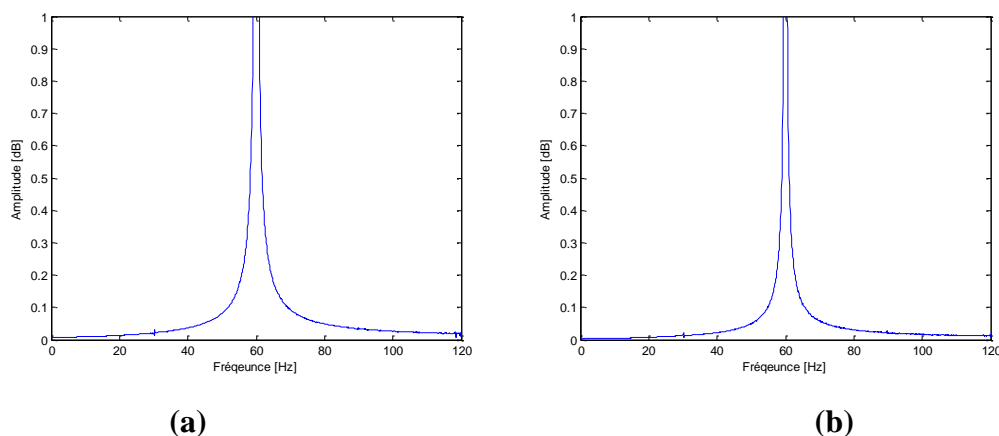
### III.2.1.3. Interprétation des signaux

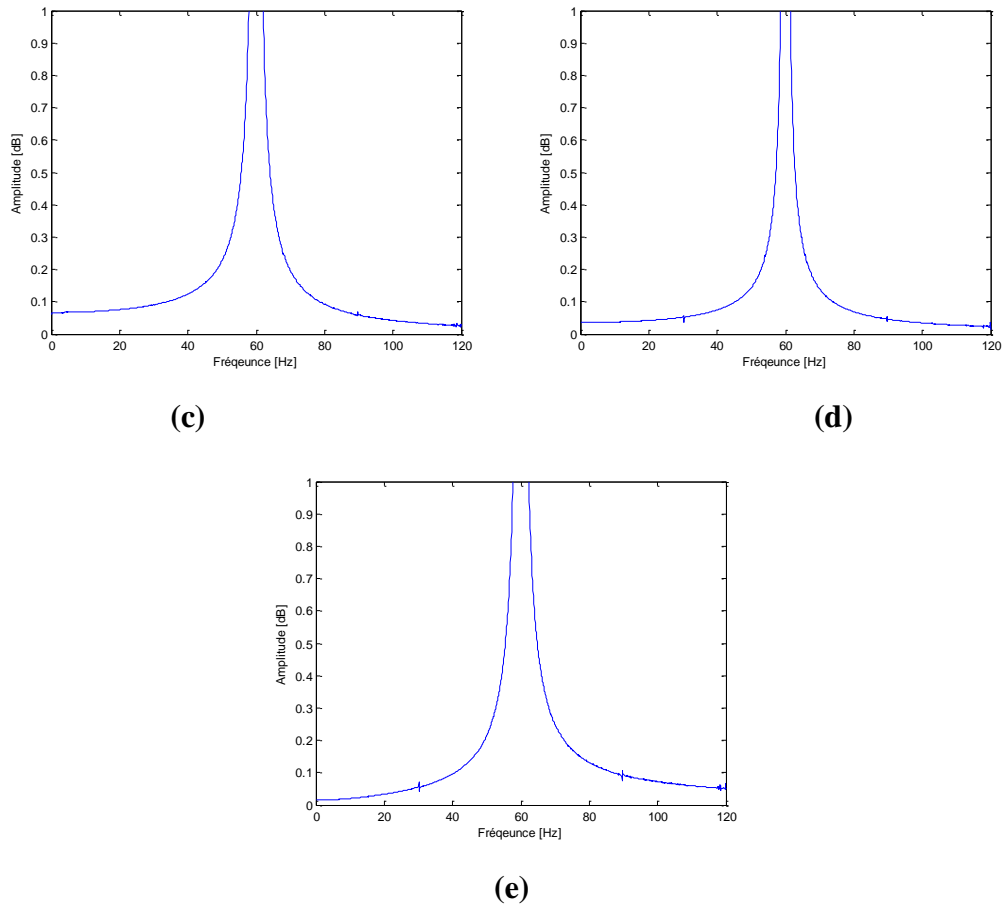
À 5% de charge, les défauts de cassure de barre ne sont pas visibles dans les spectres de tension "Figure III.01". Cependant, l'analyse d'enveloppe du spectre montre une augmentation progressive de l'amplitude à la fréquence de défaut ( $60+2gf_s$ ) avec le nombre de barres cassées, indiquant la présence de défaut même à faible charge "Figure III.02".

- Sans barre cassée (Bo) : Tension de 0.00023, montrant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Tension de 0.016, avec une augmentation significative par rapport au cas sain, indiquant une anomalie détectée.
- Deux barres cassées (B2) : Tension de 0.0068, avec une augmentation moins prononcée par rapport au cas avec une barre cassée, mais toujours supérieure au cas sain.
- Trois barres cassées (B3) : Tension de 0.012, montrant une augmentation par rapport au cas avec deux barres cassées, mais avec des fluctuations importantes.
- Quatre barres cassées (B4) : Tension de 0.018, avec une augmentation supplémentaire par rapport au cas avec trois barres cassées, indiquant des dommages structurels étendus.

## III.2.2 Analyse des tensions mesurées à 10% de charge

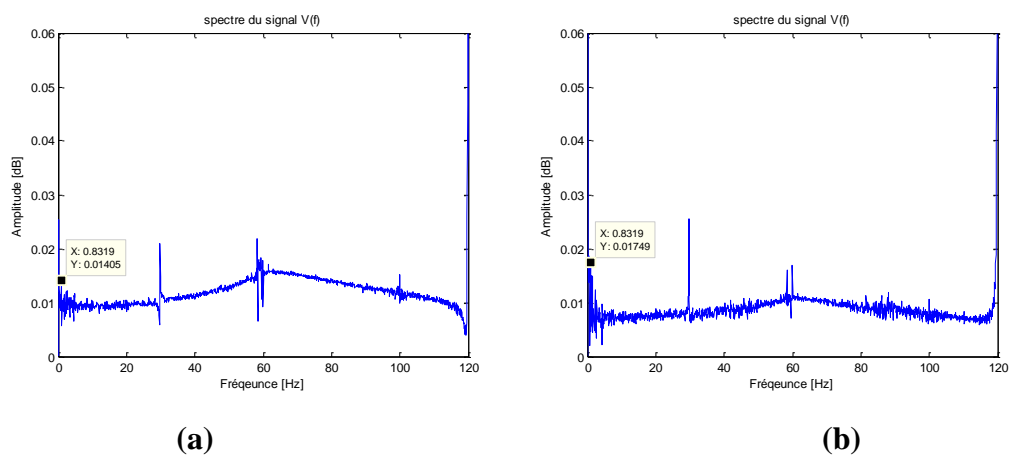
### III.2.2.1 Spectres de tension



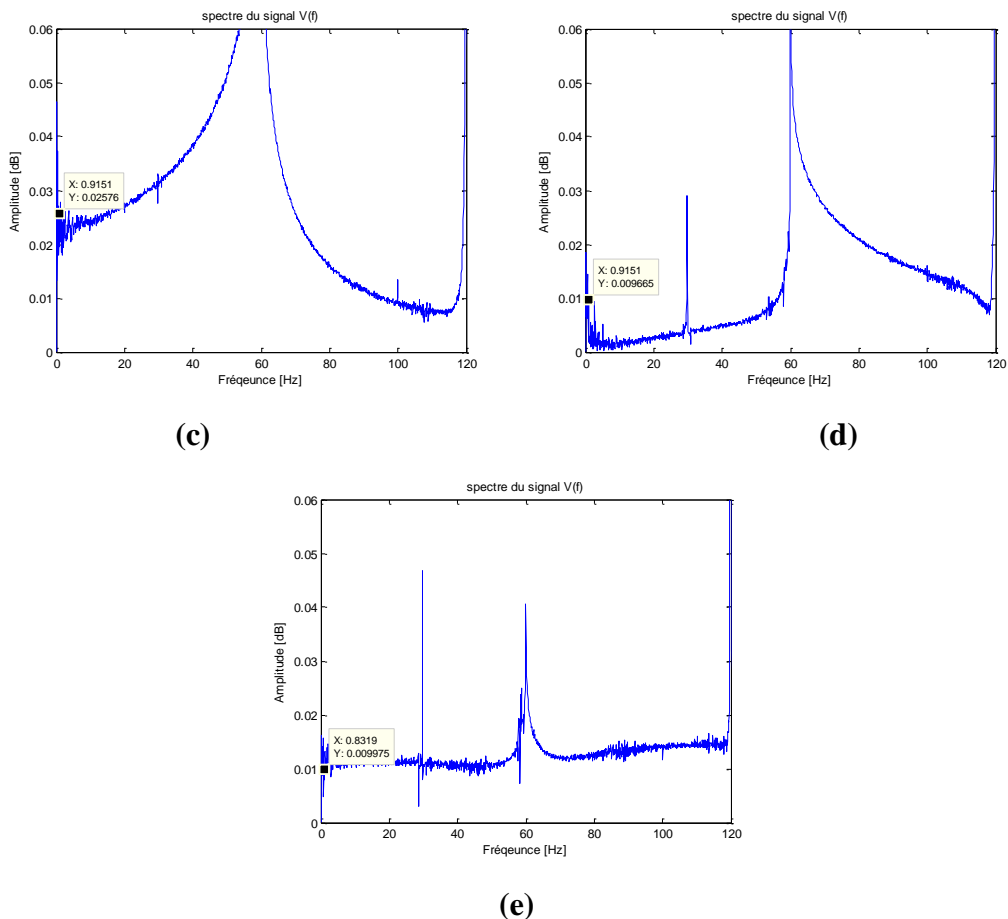


**Figure III.03 :** Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 10%) :  
 (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

### III.2.2.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension







**Figure III.04** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 10%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

### III.2.2.3. Interprétation des signaux

À 10% de charge, les défauts de cassure de barres commencent à être plus visibles avec l'analyse d'enveloppe de spectre " **Figure III.04**", montrant une variation dans les amplitudes en fonction du nombre de barres cassées.

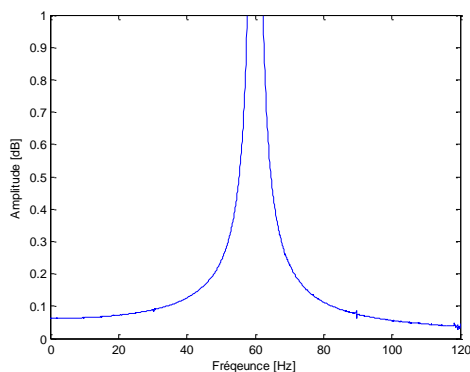
- Sans barre cassée (Bo) : Tension de 0.014, montrant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Tension de 0.017, avec une augmentation par rapport au cas sain, indiquant une anomalie détectée.

- Deux barres cassées (B2) : Tension de 0.025, avec une augmentation significative par rapport au cas avec une barre cassée, indiquant des dommages structurels plus étendus.
- Trois barres cassées (B3) : Tension de 0.0096, montrant une diminution par rapport au cas avec deux barres cassées, mais avec des fluctuations importantes.
- Quatre barres cassées (B4) : Tension de 0.0099, montrant une légère augmentation par rapport au cas avec trois barres cassées, indiquant des dommages structurels continus.

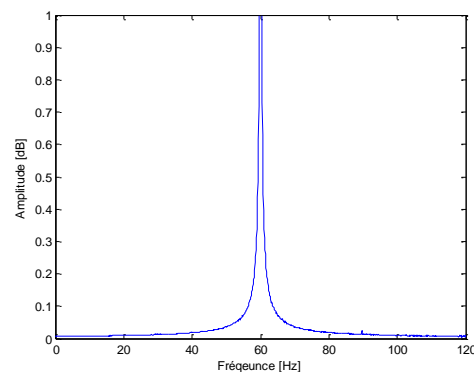
Ces résultats confirment une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de tension observées, soulignant une sensibilité croissante du système aux défauts structurels sous une charge de 10%.

### III.2.3 Analyse des tensions mesurées à 15% de charge

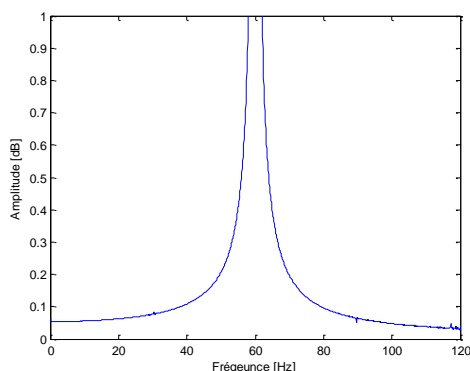
#### III.2.3.1. Spectre de tension



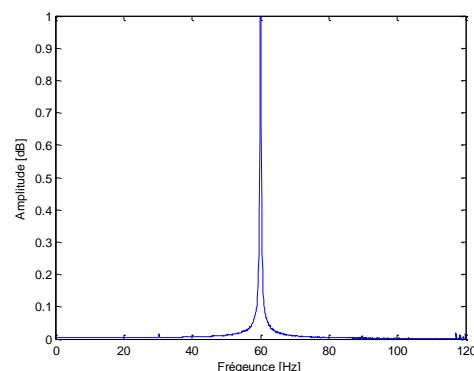
(a)



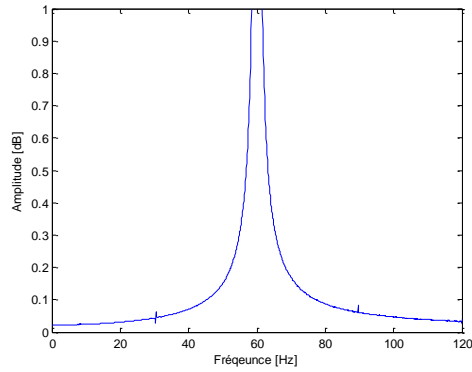
(b)



(c)



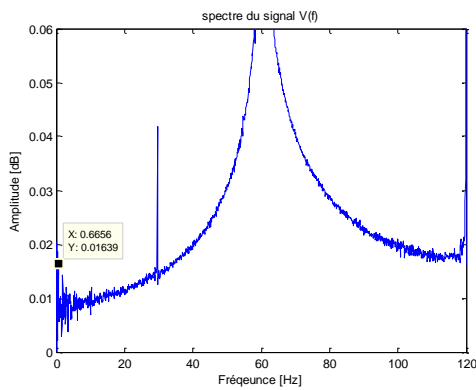
(d)



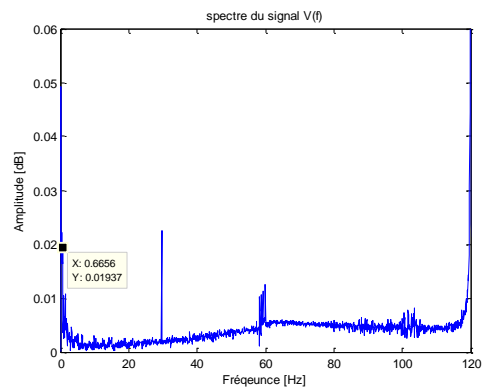
(e)

**Figure III.05 :** Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 15%) :  
 (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

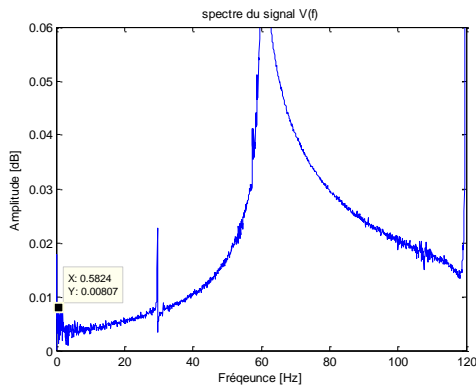
### III.2.3.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension



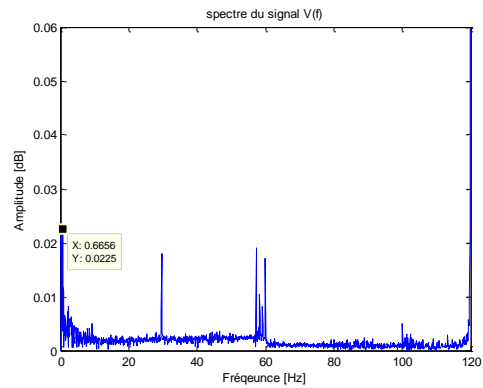
(a)



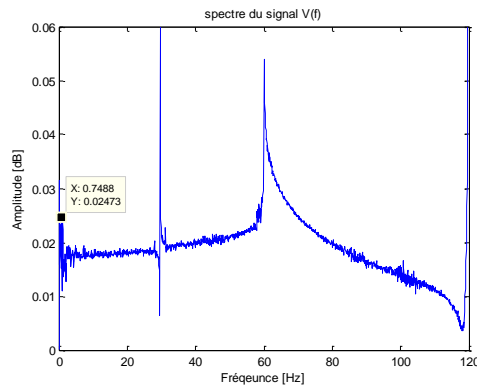
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure III.06:** Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 15%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

### III.2.3.3. Interprétation des signaux

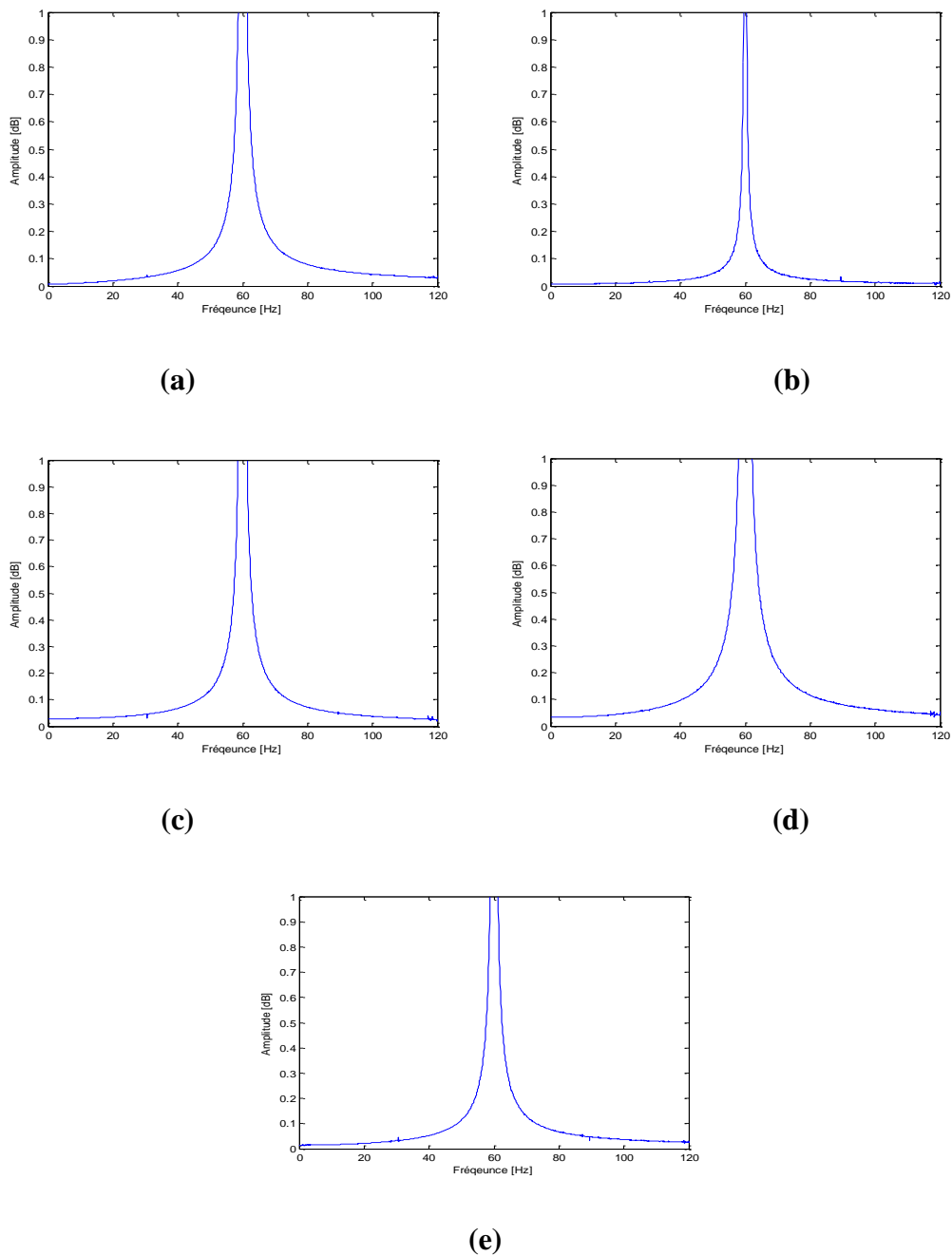
À 15% de charge, les défauts de cassures de barre sont mieux visibles avec l'analyse d'enveloppe de spectre "Figure III.05", les amplitudes augmentent globalement avec le nombre de barres cassées, montrant la détection des défauts

- Sans barre cassée (Bo) : Tension de 0.016, montrant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Tension de 0.019, avec une augmentation par rapport au cas sain, indiquant une anomalie détectée.
- Deux barres cassées (B2) : Tension de 0.008, avec une diminution par rapport au cas avec une barre cassée, mais avec des fluctuations importantes.
- Trois barres cassées (B3) : Tension de 0.0225, montrant une augmentation par rapport au cas avec deux barres cassées, indiquant des dommages structurels plus importants.
- Quatre barres cassées (B4) : Tension de 0.024, montrant une légère augmentation par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des dommages structurels continus.

Ces résultats soulignent une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de tension observées, confirmant une sensibilité croissante du système aux défauts structuraux sous une charge de 15%.

### III.2.4 Analyse des tensions mesurées à 20% de charge

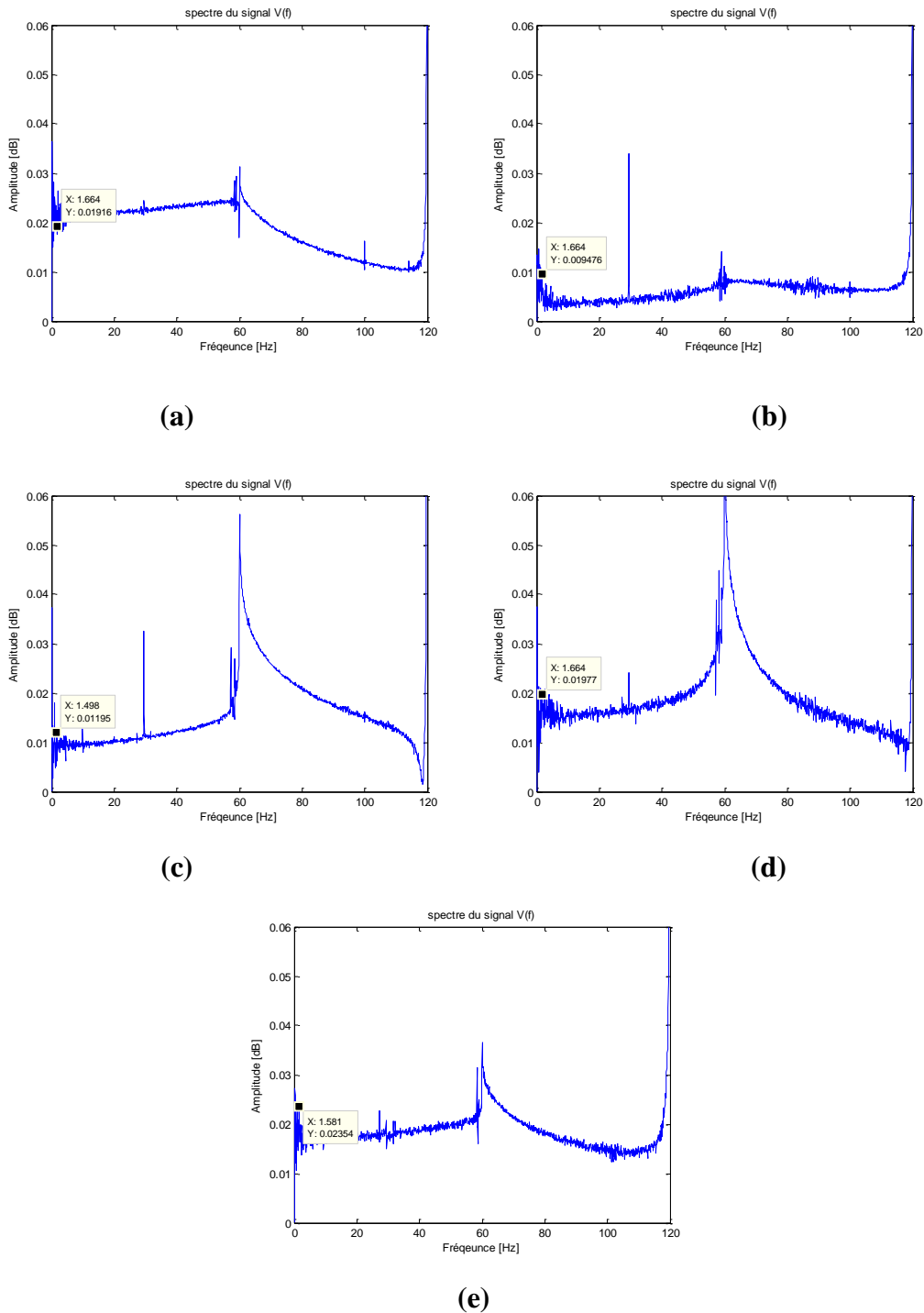
#### III.2.4.1. Spectre de tension



**Figure III.07 :** Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 20%) :

(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

### III.2.4.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension



**Figure III.08 :** Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 20 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

### III.2.4.3. Interprétation des signaux

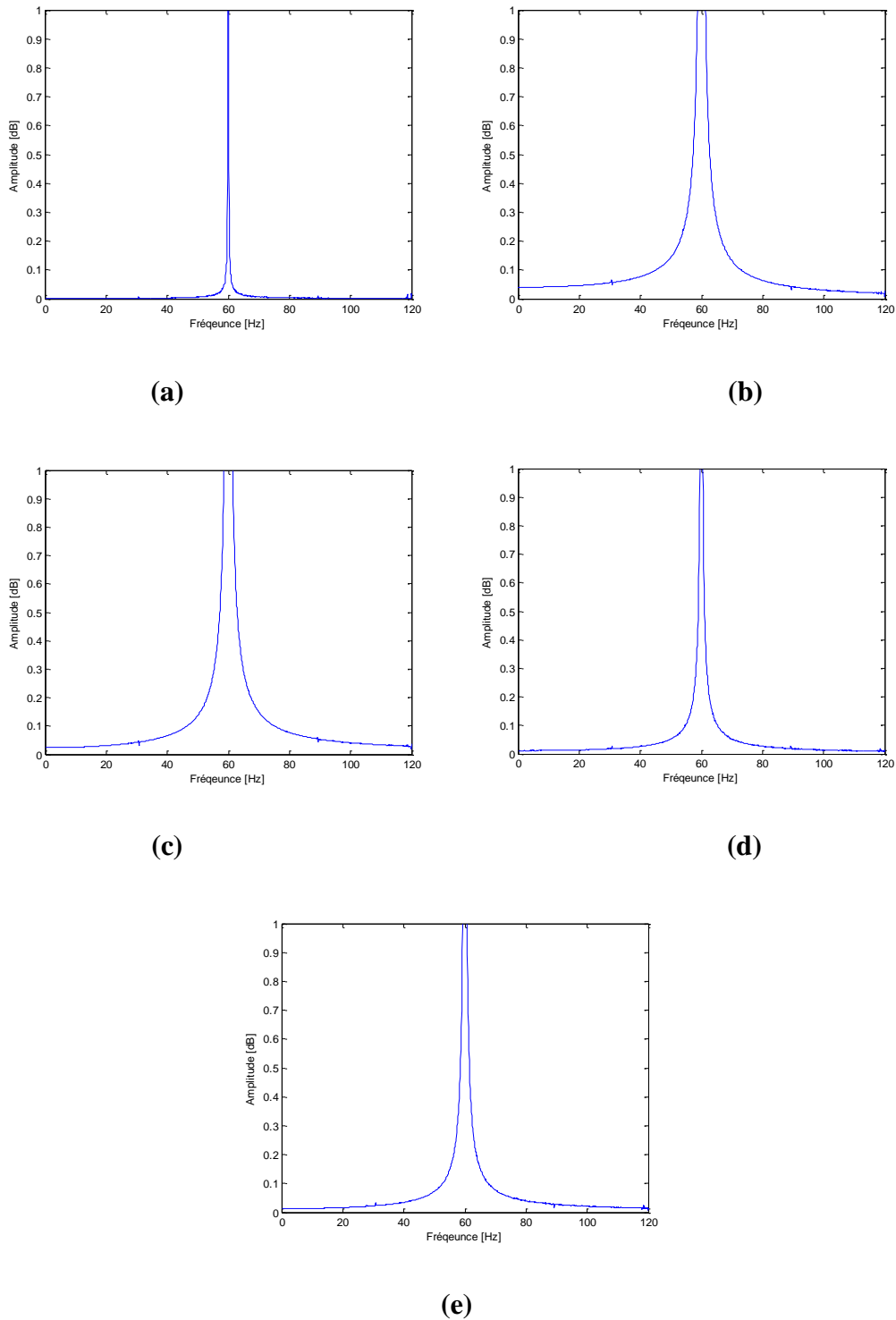
À 20% de charge, les défauts de cassures de barre sont plus détectables avec l'analyse d'enveloppe de spectre **''Figure III.08''**, et la présence de petites amplitudes pour 3 et 4 barres cassées dans les spectres de tension [(d), (e)] **''Figure III.07''**, commence à indiquer des défauts.

- Sans barre cassée (Bo) : Tension de 0.019, montrant une réponse électrique relativement stable à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Tension de 0.009, avec une diminution significative par rapport au cas sain, indiquant une anomalie détectée.
- Deux barres cassées (B2) : Tension de 0.0119, montrant une légère augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais toujours inférieure au cas sain.
- Trois barres cassées (B3) : Tension de 0.0197, montrant une augmentation par rapport au cas avec deux barres cassées, indiquant des dommages structurels plus importants.
- Quatre barres cassées (B4) : Tension de 0.0023, montrant une diminution significative par rapport au cas avec trois barres cassées, indiquant des dommages structurels continus.

Ces résultats soulignent une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de tension observées, confirmant une sensibilité croissante du système aux défauts structurels sous une charge de 20%.

### III.2.5 Analyse des tensions mesurées à 25% de charge

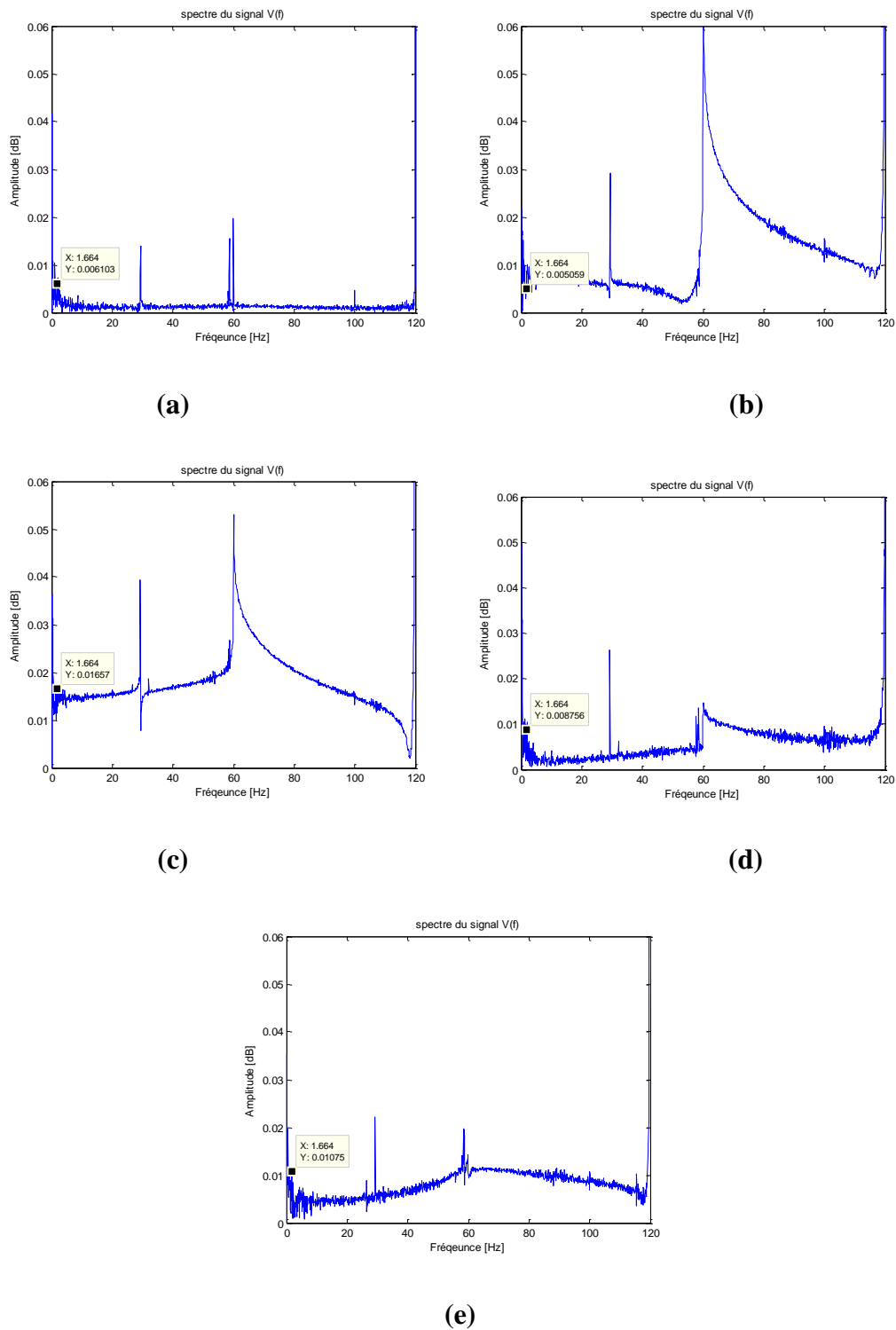
#### III.2.5.1. Spectres de tension



**Figure III.09 :** Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 25%) :  
(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées



### III.2.5.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension



**Figure III.10** : Spectres d'envelopes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 25%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### III.2.5.3. Interprétation des signaux

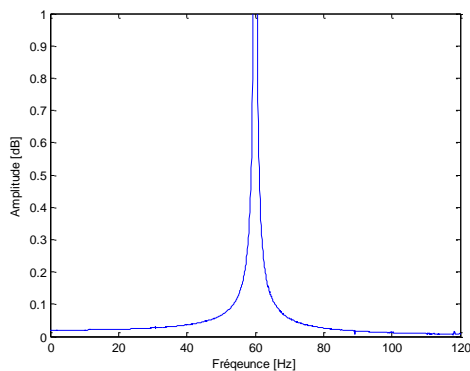
À 25% de charge, l'analyse d'enveloppe de spectre de tension continue à montrer des amplitudes variables "Figure III.09", indiquant des défauts en fonction du nombre de barres cassées.

- Sans barre cassée (Bo) : Tension de 0.0061, montrant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Tension de 0.005, avec une diminution par rapport au cas sain, mais la différence est minime.
- Deux barres cassées (B2) : Tension de 0.016, montrant une augmentation significative par rapport au cas avec une barre cassée, indiquant des dommages structurels étendus.
- Trois barres cassées (B3) : Tension de 0.0087, montrant une diminution par rapport au cas avec deux barres cassées, mais avec des fluctuations importantes.
- Quatre barres cassées (B4) : Tension de 0.0107, montrant une légère augmentation par rapport au cas avec trois barres cassées, indiquant des dommages structurels continus.

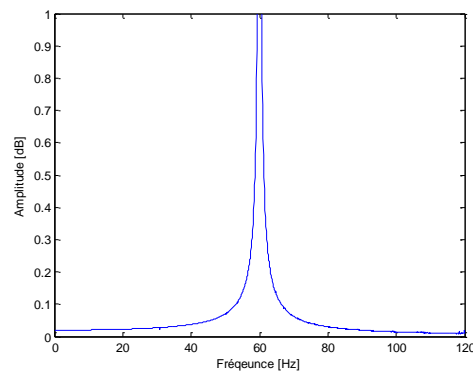
Ces résultats soulignent une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de tension observées, confirmant une sensibilité croissante du système aux défauts structurels sous une charge de 25%.

### III.2.6 Analyse des tensions mesurées à 30% de charge

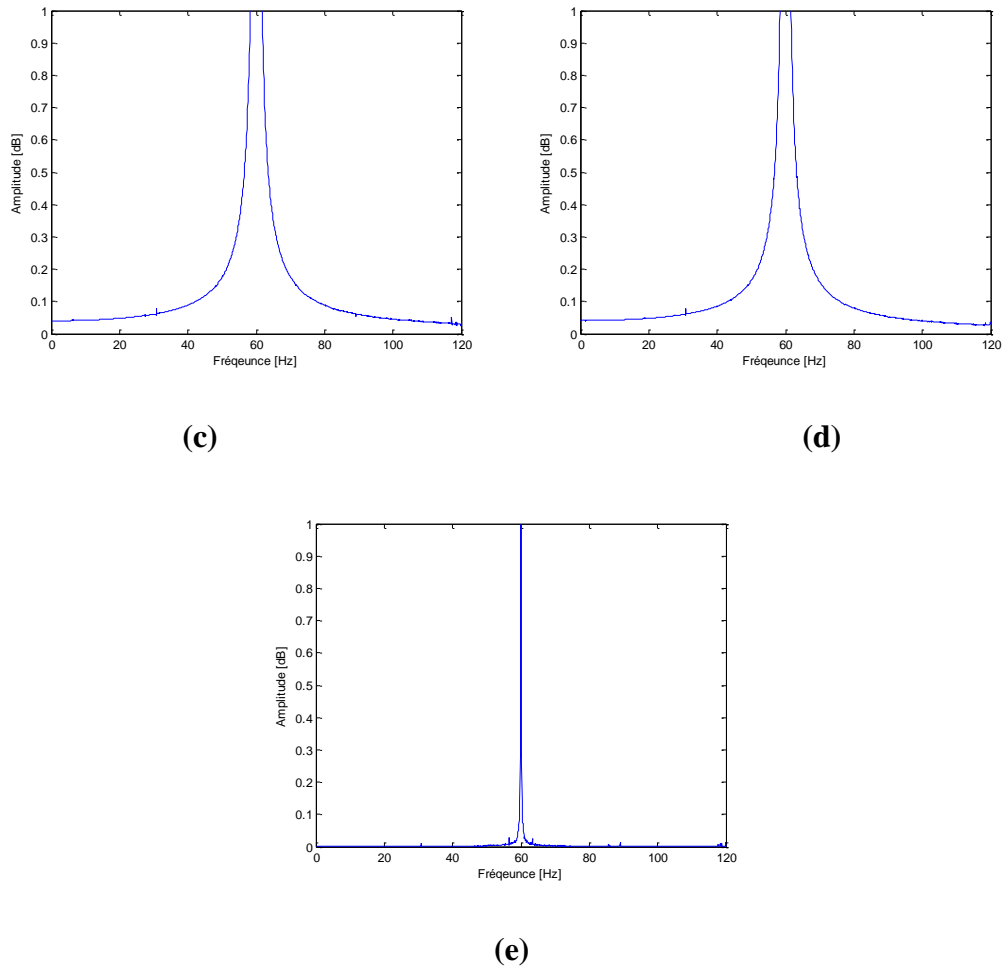
#### III.2.6.1. Spectre de tension



(a)

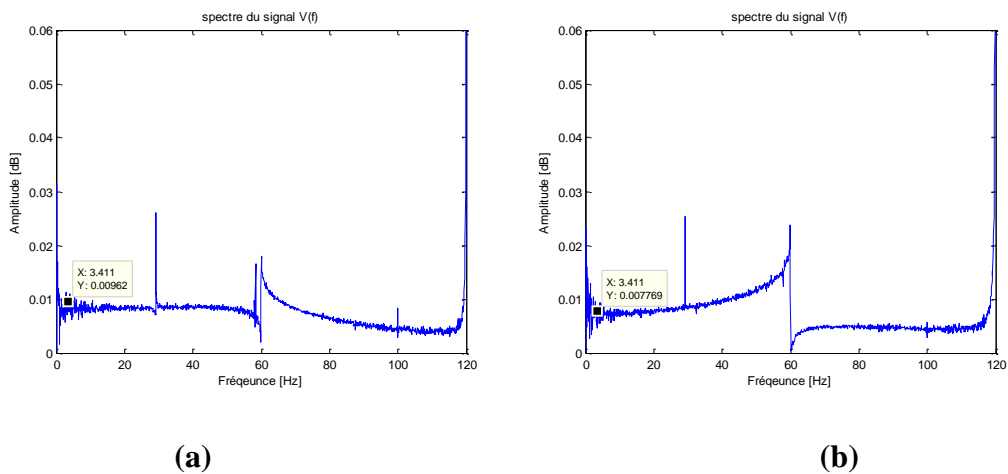


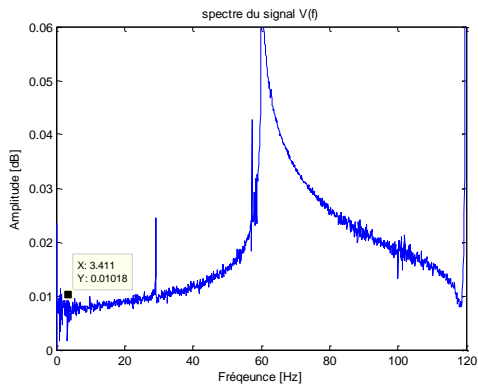
(b)



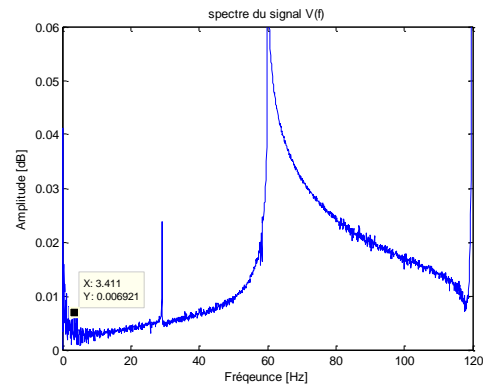
**Figure III.11** : Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 30%) :  
 (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barre cassées et (e) 4 barre cassées

### III.2.6.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension

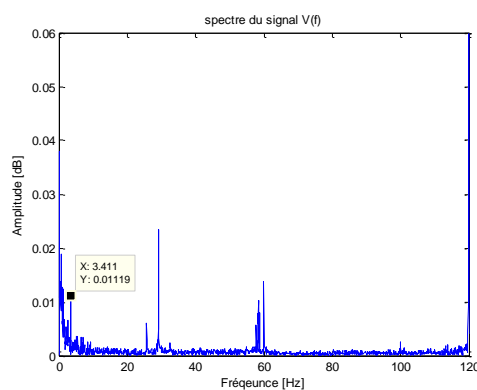




(c)



(d)



(e)

**Figure III.12** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 30 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### III.2.6.3. Interprétation des signaux

À 30% de charge, l'analyse d'enveloppe de spectre de tension montre des défauts détectables avec des amplitudes plus claires pour 4 barres cassées "Figure III.12", confirmant la présence de défauts.

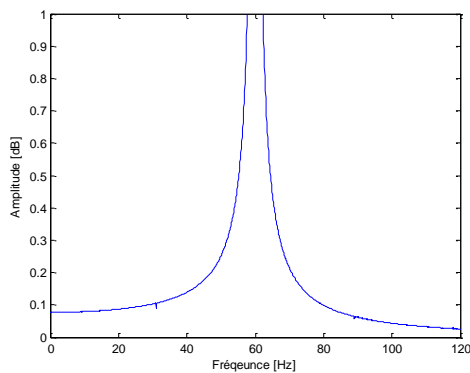
- Sans barre cassée (Bo) : Tension de 0.009, montrant une réponse électrique relativement stable à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Tension de 0.0077, avec une légère diminution par rapport au cas sain, indiquant une anomalie détectée.

- Deux barres cassées (B2) : Tension de 0.01, montrant une légère augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais toujours relativement proche du cas sain.
- Trois barres cassées (B3) : Tension de 0.0069, montrant une diminution par rapport au cas avec deux barres cassées, mais avec des fluctuations importantes.
- Quatre barres cassées (B4) : Tension de 0.0119, montrant une légère augmentation par rapport au cas avec trois barres cassées, indiquant des dommages structurels continus.

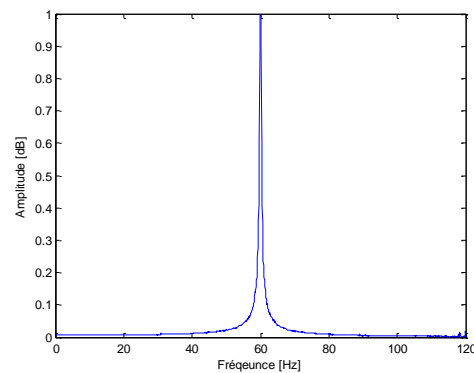
Ces résultats soulignent une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de tension observées, confirmant une sensibilité croissante du système aux défauts structurels sous une charge de 30%.

### III.2.7 Analyse des tensions mesurées à 35% de charge

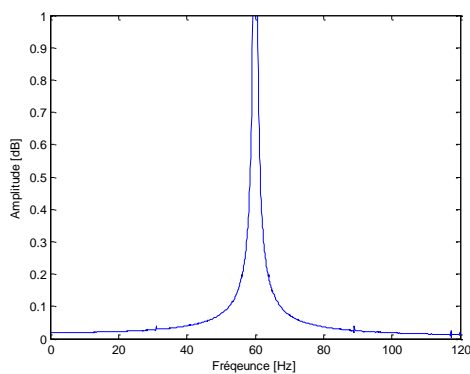
#### III.2.7.1. Spectres de tension



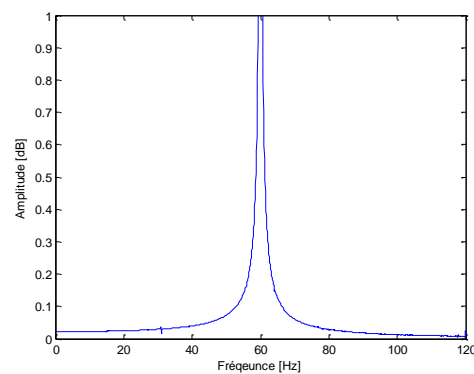
(a)



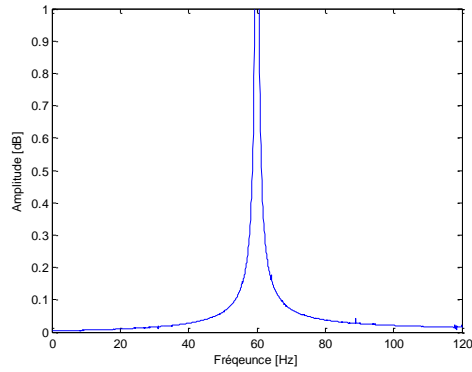
(b)



(c)



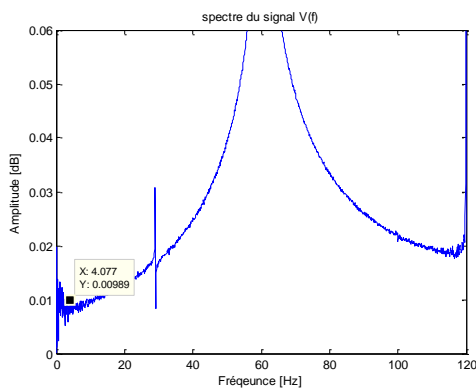
(d)



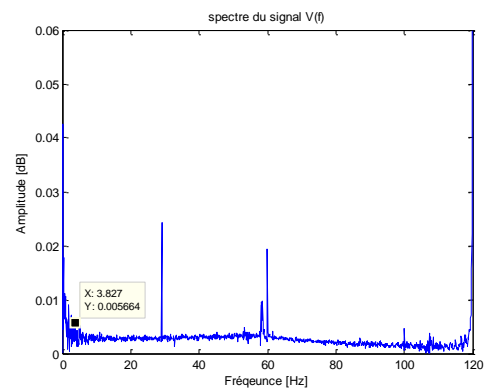
(e)

**Figure III.13 :** Spectre de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 35%) :  
 (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

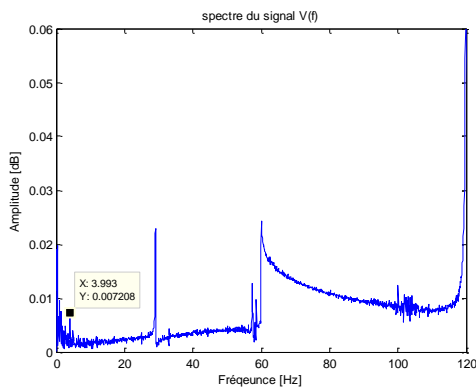
### III.2.7.2. Analyse du spectre d'enveloppe



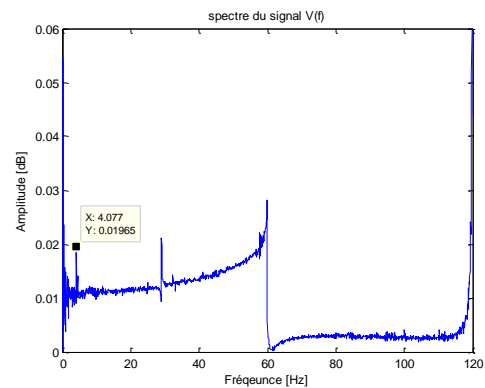
(a)



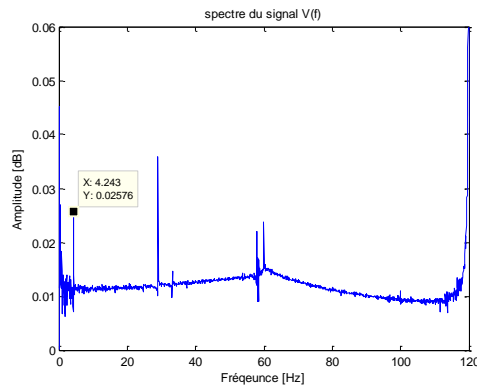
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure III.14** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 35 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### III.2.7.3. Interprétation des signaux

À 35% de charge, les défauts de cassures de barre ne sont pas visibles dans les spectres de tension "Figure III.13 [(a), (b), (c), (d)]", sauf pour 4 barres cassées où une petite amplitude est détectable à la fréquence de défaut "Figure III.13 [(e)]". Cependant, l'analyse d'enveloppe de spectre montre des amplitudes croissantes avec le nombre de barres cassées, confirmant la présence de défauts "Figure III.14".

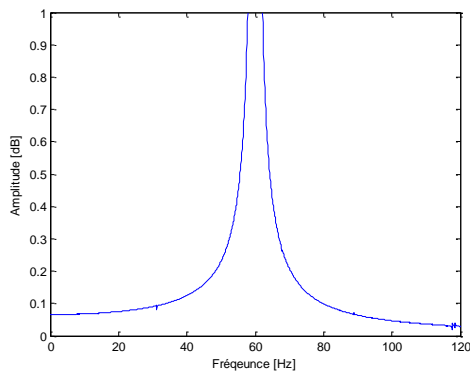
- Sans barre cassée (Bo) : Tension de 0.0098, montrant une réponse électrique relativement stable à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Tension de 0.0056, avec une diminution par rapport au cas sain, indiquant une anomalie détectée.
- Deux barres cassées (B2) : Tension de 0.0072, montrant une légère augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais toujours relativement faible.
- Trois barres cassées (B3) : Tension de 0.0196, montrant une augmentation significative par rapport au cas avec deux barres cassées, indiquant des dommages structurels plus importants.

- Quatre barres cassées (B4) : Tension de 0.0257, montrant une augmentation supplémentaire par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des dommages structurels continus.

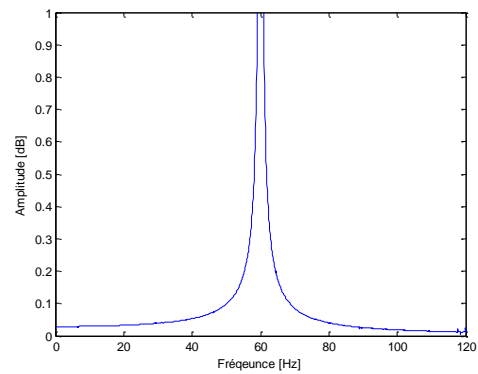
Ces résultats soulignent une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de tension observées, confirmant une sensibilité croissante du système aux défauts structurels sous une charge de 35%.

### III.2.8 Analyse des tensions mesurées à 40% de charge

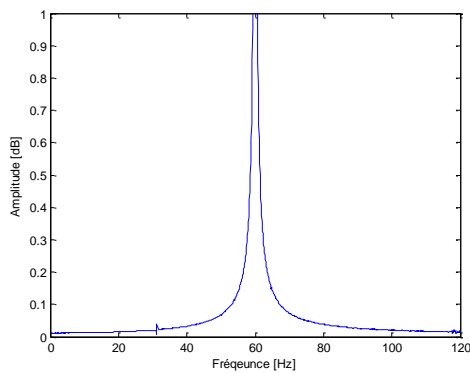
#### III.2.8.1. Spectres de tension



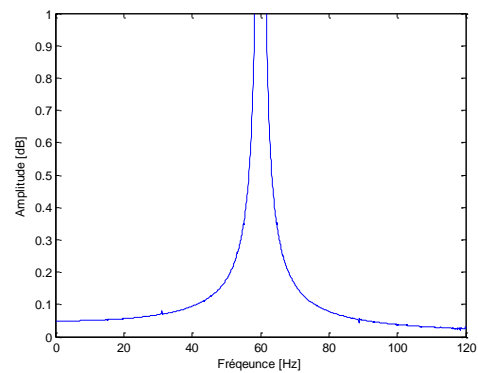
(a)



(b)

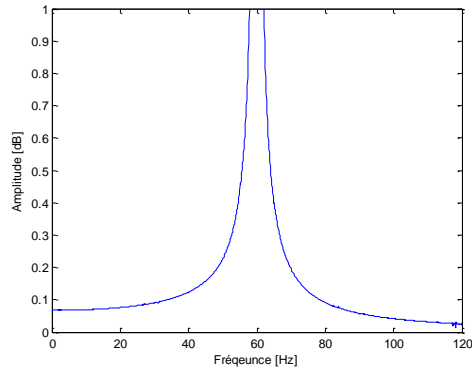


(c)



(d)

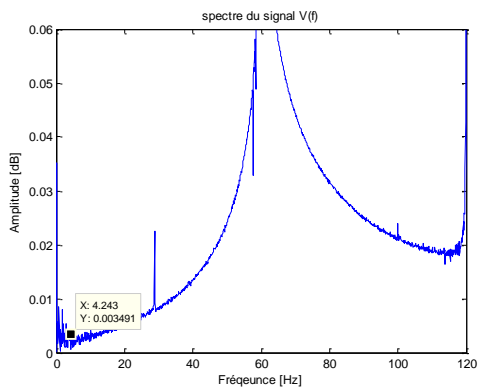




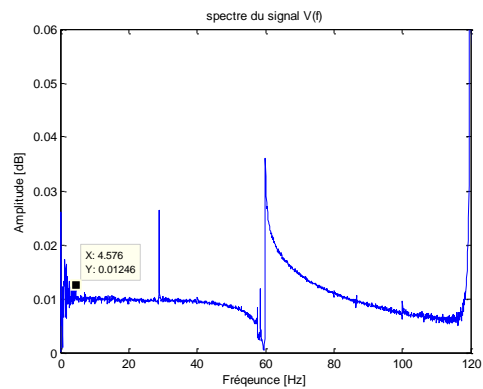
(e)

Figure III.15 : Spectres de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 40%) :  
 (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

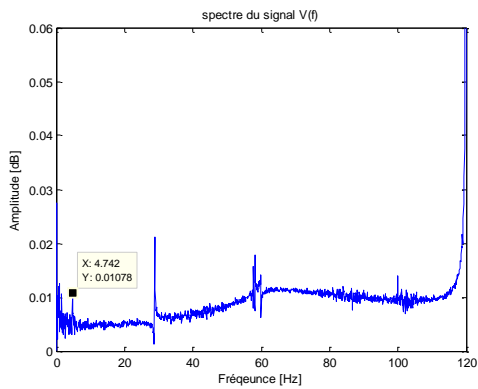
### III.2.8.2. Analyse du spectre d'enveloppe de la tension



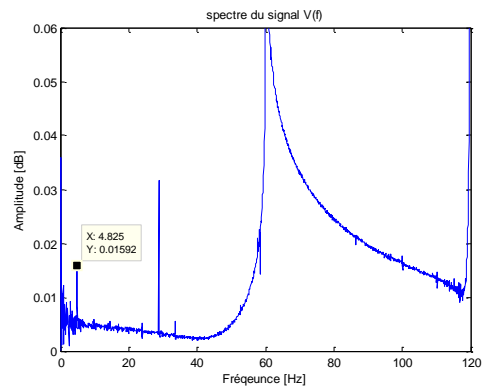
(a)



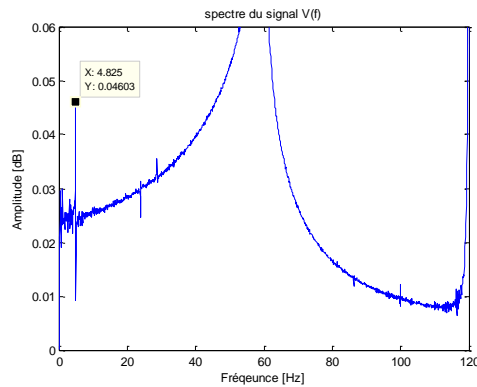
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure III.16** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 40%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### III.2.8.3. Interprétation des signaux

À 40% de charge, les défauts de cassure de barre ne sont pas visibles dans les spectres de tension ''**Figure III.15**''. L'analyse d'enveloppe des spectres montre des amplitudes croissantes avec le nombre de barres cassées, confirmant des défauts de plus en plus prononcés ''**Figure III.16**''.

- Sans barre cassée (Bo) : Tension de 0.349, montrant une réponse électrique relativement élevée à cette charge.
- Une barre cassée (B1) : Tension de 0.0124, avec une diminution significative par rapport au cas sain, indiquant une anomalie détectée.
- Deux barres cassées (B2) : Tension de 0.0107, montrant une légère diminution par rapport au cas avec une barre cassée, mais toujours relativement élevée.
- Trois barres cassées (B3) : Tension de 0.0159, montrant une augmentation par rapport au cas avec deux barres cassées, mais avec des fluctuations importantes.
- Quatre barres cassées (B4) : Tension de 0.046, montrant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des dommages structurels continus.

Ces résultats soulignent une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de tension observées, confirmant une sensibilité croissante du système aux défauts structurels sous une charge de 40%.

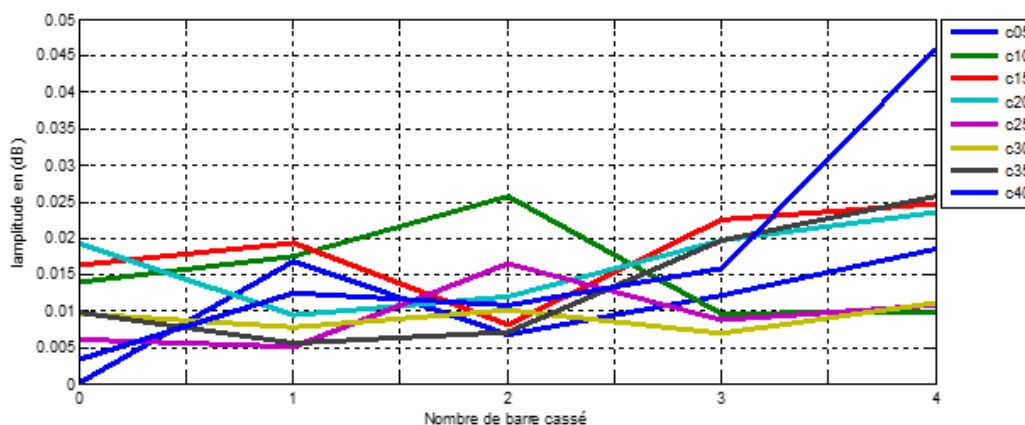
### III.3. Récapitulatif des résultats

Les amplitudes de tension obtenues par analyse d'enveloppe à la fréquence  $2gf_s$  sont enregistrées sur le tableau ci-dessous pour représenter les mesures de tension enregistrées à différents moments. Ensuite, des courbes sont tracées à partir de ces données, reflétant les variations de tension en fonction de charge et la sévérité du défaut de barres cassées.

**Tableau III.01 :** Tableau des amplitudes de tension à la fréquence du défaut ( $2gf_s$ ) obtenues par analyse d'enveloppe sous différentes charges et différents nombres de barres cassées

charge en %	40	35	30	25	20	15	10	5
b0	0,03491	0,00989	0,00962	0,006103	0,01918	0,01639	0,01405	0,0002361
b1	0,01246	0,005664	0,007769	0,005059	0,009476	0,01937	0,01749	0,01689
b2	0,01078	0,007208	0,01018	0,01657	0,01195	0,00807	0,02578	0,006875
b3	0,01592	0,01965	0,006921	0,008756	0,01977	0,0225	0,009665	0,01216
b4	0,04603	0,02578	0,0119	0,01075	0,02354	0,02473	0,009975	0,0186

Le graphe (**Figure III.17**) généré par les résultats du tableau montre que les amplitudes liées au défaut de cassure de barres ne suivent pas une progression croissante lorsque la charge et la sévérité du défaut augmentent. Cette variabilité peut s'expliquer par plusieurs facteurs liés à la nature complexe des vibrations et des courants dans les moteurs asynchrones.



**Figure III.17 :** Variation de l'amplitude de tension à la fréquence démodulée du défaut ( $2gf_s$ ) pour différentes charges en fonction du nombre de barres cassées

Malgré la démodulation des signaux de tension mesurés, les résultats obtenus ne correspondent pas aux prévisions et aux attentes initiales, ce qui suggère que notre méthode de d'analyse pourrait nécessiter des ajustements ou des améliorations pour mieux refléter la réalité ou produire des résultats plus précis. Cependant, malgré l'utilisation de l'analyse d'enveloppe, les résultats n'ont pas été aussi efficaces que prévu.

### Conclusion

Les spectres de la tension devraient fournir des informations sur l'état de la machine, mais ces informations ne sont pas satisfaisantes.

L'analyse de la tension démontre que la détection des défauts dans les moteurs asynchrones est une tâche complexe influencée par de multiples facteurs. Afin de trouver la fréquence démodulée, on utilise l'analyse d'enveloppe. Néanmoins, les variations des amplitudes de la tension à la fréquence démodulée du défaut ( $2gf_s$ ) en fonction du nombre de barres cassées au rotor et de la charge appliquée révèlent une allure non linéaire et parfois imprévisible du comportement des moteurs asynchrones.

L'analyse de la tension, bien qu'utile pour identifier des anomalies générales de fonctionnement dans les machines asynchrones, n'est généralement pas suffisante pour détecter clairement les cassures de barres au rotor. En effet, les variations de tension peuvent être causées par divers facteurs comme des déséquilibres d'alimentation ou des variations de charge, rendant cette méthode moins spécifique aux défauts de cassure de barres.

---

# **CHAPITRE IV**

**Mesure de courant pour la détection des défauts**

### Introduction

L'analyse du courant statorique des moteurs asynchrones s'impose comme une technique essentielle de diagnostic pour identifier les cassures de barres de rotor. Cette approche permet de détecter avec précision ces défauts grâce aux outils de traitement du signal de courant et à la reconnaissance de signatures caractéristiques. Les avantages de cette méthode incluent sa simplicité de mise en œuvre, sa sensibilité élevée et sa capacité à prévenir des pannes critiques. L'analyse du courant se révèle ainsi comme un outil précieux pour la surveillance de l'état des machines asynchrones et la maintenance préventive.

### IV.1 Étude des barres cassées dans les machines asynchrones par l'analyse de courant

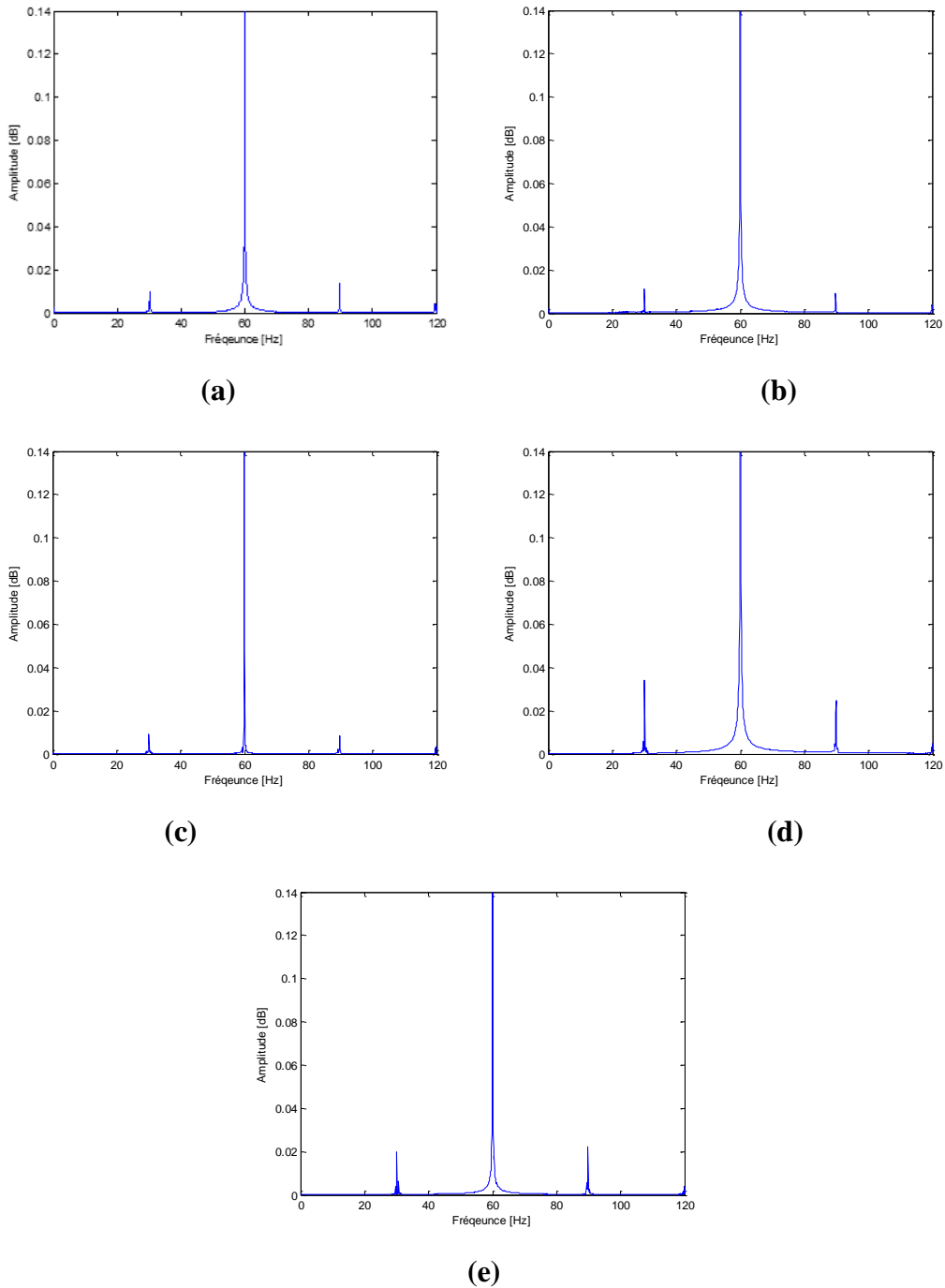
Les barres fracturées dans les moteurs asynchrones entraînent des déséquilibres et des anomalies électriques détectables par des techniques d'analyse de courant. En utilisant cette technique, nous pouvons traiter et analyser avec précision les données de courant mesuré sur le banc présenté au premier chapitre. La transformée de Fourier permet d'identifier les fréquences caractéristiques des barres fracturées  $((1 \pm 2kg)f_s)$ , tandis que l'analyse d'enveloppe (Hilbert) permet la démodulation des signaux de courant et de mettre en évidence les variations des signaux de courant associées à ces défauts. Cette approche devra assurer une détection précoce et précise de l'évolution des barres fracturées, facilitant des interventions rapides pour éviter des dommages plus graves et des arrêts prolongés.

### IV.2. Résultats expérimentaux de la rupture de barres

Les résultats expérimentaux prendront en compte les conditions de charge et le nombre de barres cassées. Les données seront représentées par des graphiques illustrant l'amplitude du signal de courant en fonction des fréquences. Cette étude permet l'analyse de l'effet des barres fracturées dans un rotor à cage d'écureuil. Pour chaque niveau de défaillance des barres, nous examinerons les variations d'amplitude aux fréquences de défaut  $((1 \pm 2kg)f_s)$ .

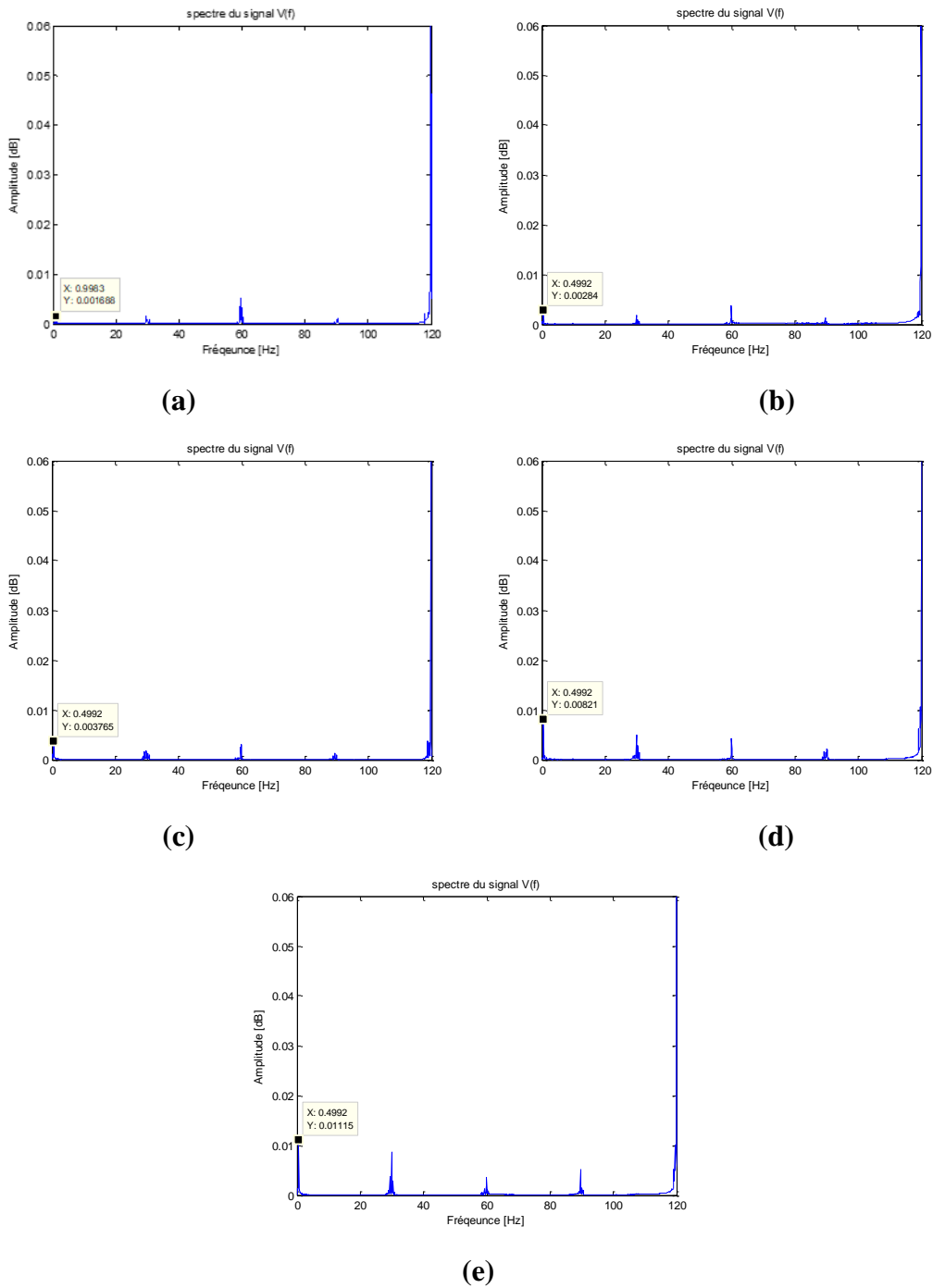
## IV.2.1 Analyse des courants mesurés à 05% de charge

### IV.2.1.1. Spectres du courant



**Figure IV.01** : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 05%) :  
(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.1.2. Spectres d'enveloppe du courant



**Figure IV.02** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 5 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées



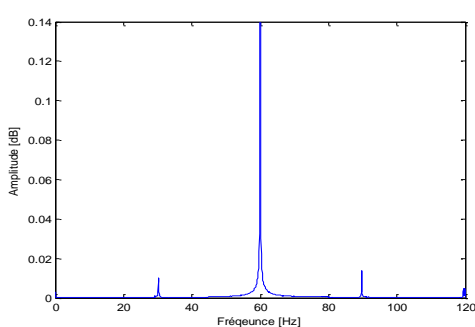
### IV.2.1.3. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (0 barre cassée) : Courant de 0.0016, indiquant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Avec une barre cassée (1 barre cassée) : Courant de 0.0028, montrant une augmentation significative par rapport au cas sain, suggérant une anomalie détectée.
- Avec deux barres cassées (2 barres cassées) : Courant de 0.0037, présentant une légère augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais restant relativement faible.
- Avec trois barres cassées (3 barres cassées) : Courant de 0.0082, montrant une augmentation notable par rapport au cas avec deux barres cassées, avec des fluctuations significatives.
- Avec quatre barres cassées (4 barres cassées) : Courant de 0.0111, présentant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des défauts structurels persistants.

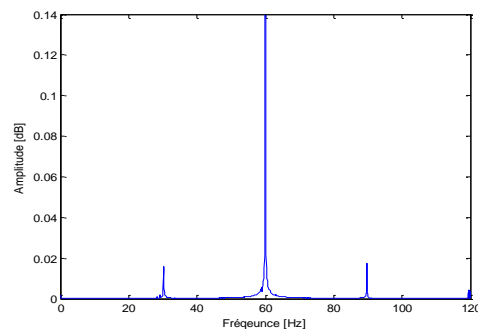
Ces résultats suggèrent une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de courant observées, mettant en évidence une sensibilité croissante du système aux défauts structurels avec l'augmentation du nombre de barres cassées. Cette analyse initiale suggère que l'analyse du courant peut être une méthode efficace pour détecter les défauts des barres cassées dans les moteurs. Voyons si cette tendance se confirme pour les autres charges.

## IV.2.2 Analyse des courants mesurés à 10% de charge

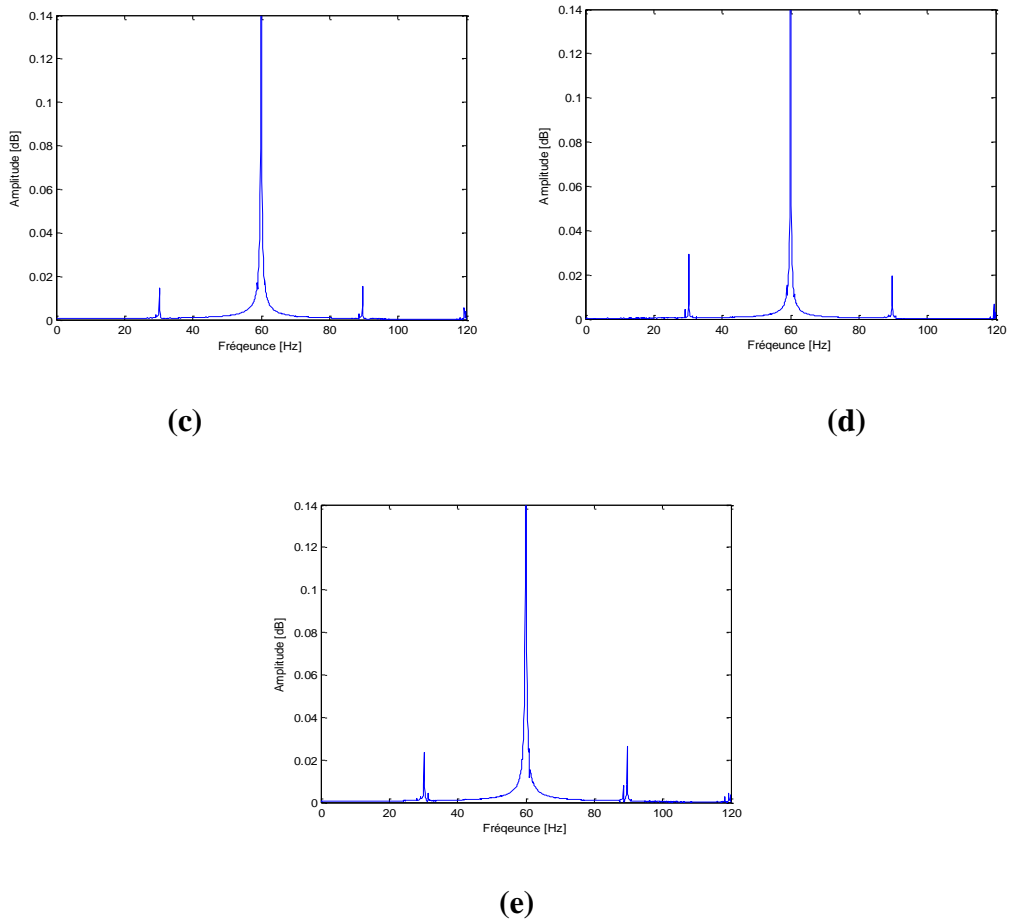
### IV.2.2.1. Spectre du courant



(a)

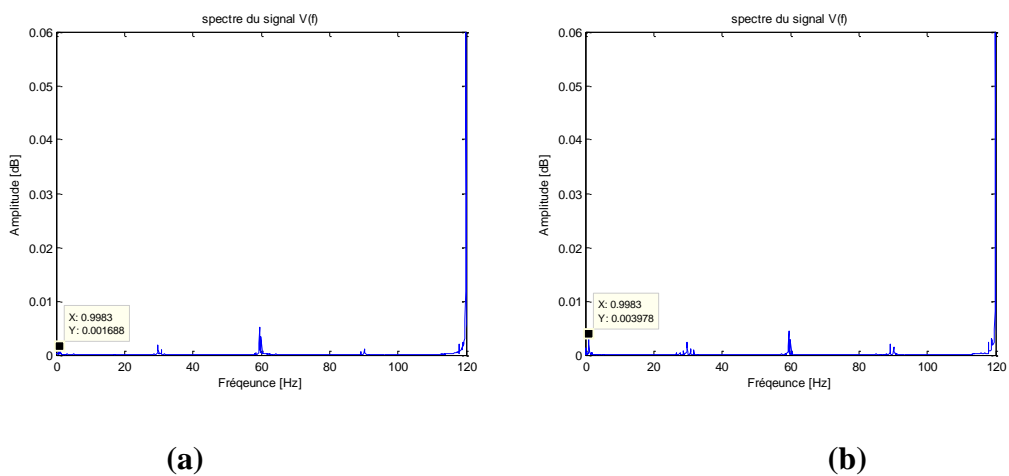


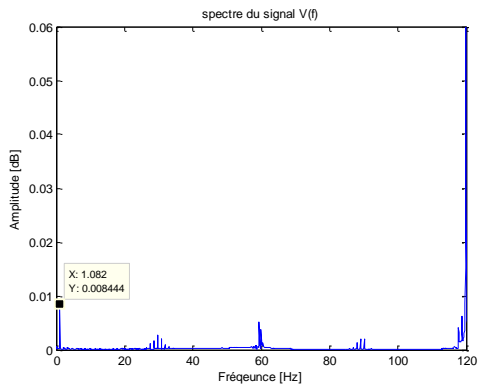
(b)



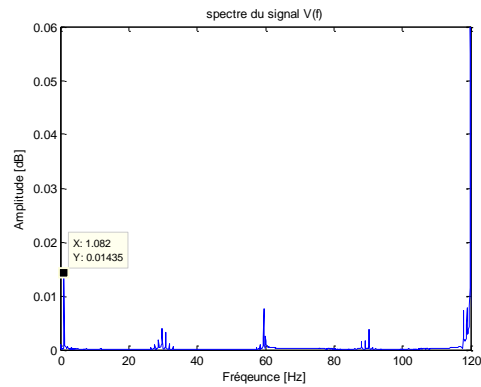
**Figure IV.03 :** Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 10%) :  
 (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

#### IV.2.2.2. Spectres d'enveloppe du courant

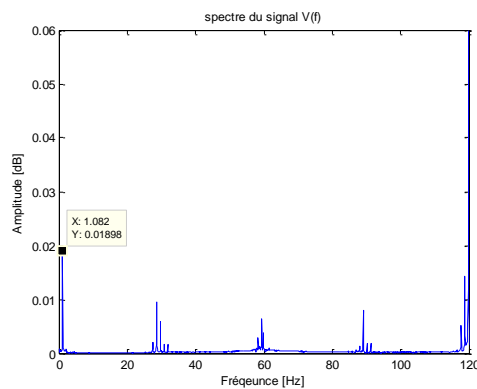




(c)



(d)



(e)

**Figure IV.04 :** Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 10 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.2.3. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (0 barre cassée) : Courant de 0.0016, montrant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Avec une barre cassée (1 barre cassée) : Courant de 0.0039, indiquant une augmentation significative par rapport au cas sain, suggérant une détection d'anomalie.
- Avec deux barres cassées (2 barres cassées) : Courant de 0.0084, présentant une augmentation notable par rapport au cas avec une barre cassée, avec des fluctuations significatives.

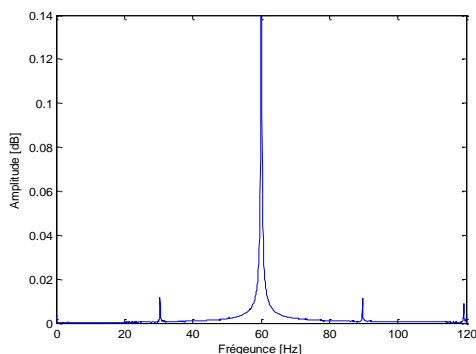
## Chapitre IV : Mesure de courant pour la détection des défauts

- Avec trois barres cassées (3 barres cassées) : Courant de 0.0143, montrant une augmentation significative par rapport au cas avec deux barres cassées, confirmant une sensibilité accrue aux défauts structurels.
- Avec quatre barres cassées (4 barres cassées) : Courant de 0.0189, indiquant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des défauts structurels persistants.

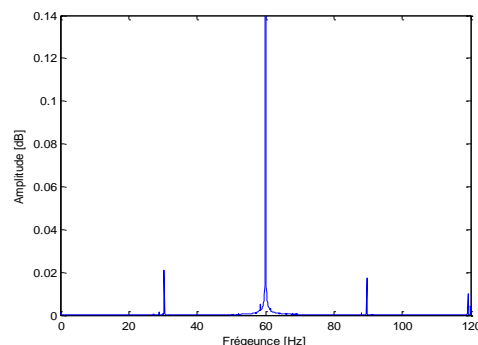
Ces résultats semblent confirmer la tendance observée pour la charge de 5%, montrant une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de courant détectées. Cela renforce l'indication que l'analyse du courant peut être une méthode efficace pour détecter les défauts des barres cassées dans les moteurs. Continuons avec la prochaine charge.

### IV.2.3. Analyse des courants mesurés à 15% de charge

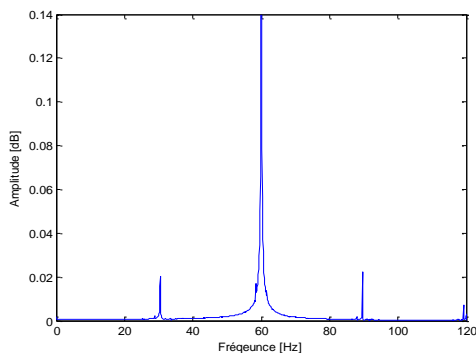
#### IV.2.3.1. Spectre du courant



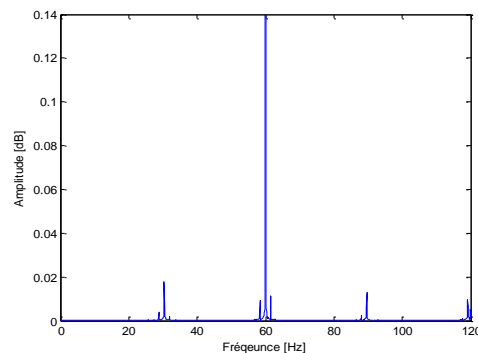
(a)



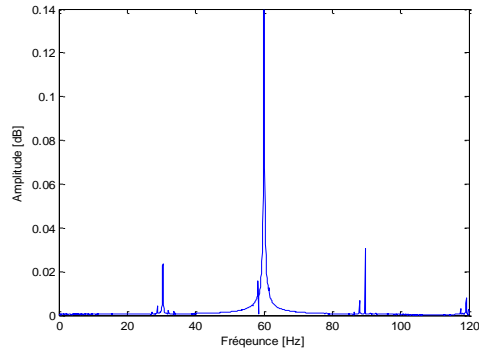
(b)



(c)



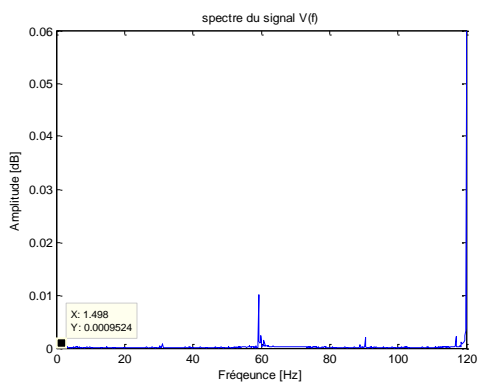
(d)



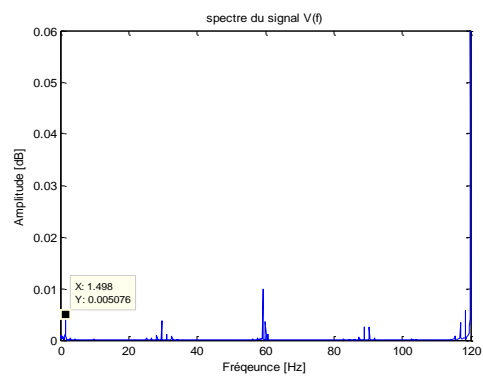
(e)

Figure IV.05 : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 15%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

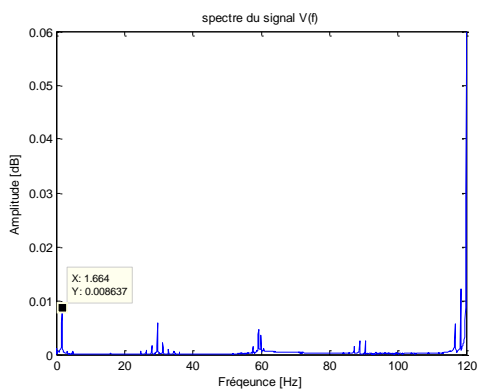
### IV.2.3.2. Spectres d'enveloppe du courant



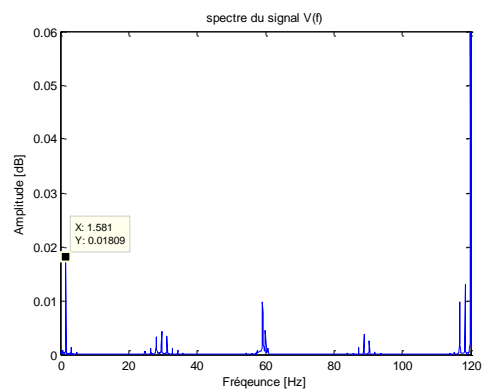
(a)



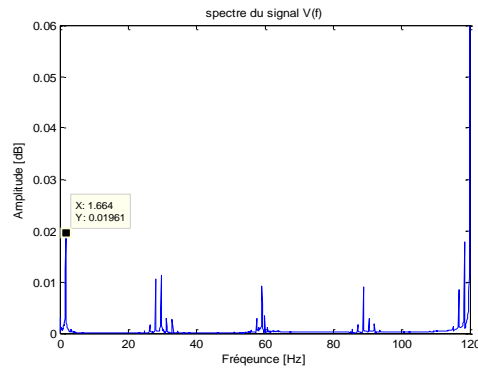
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure IV.06 :** Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 15 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.3.3. Interprétation des signaux

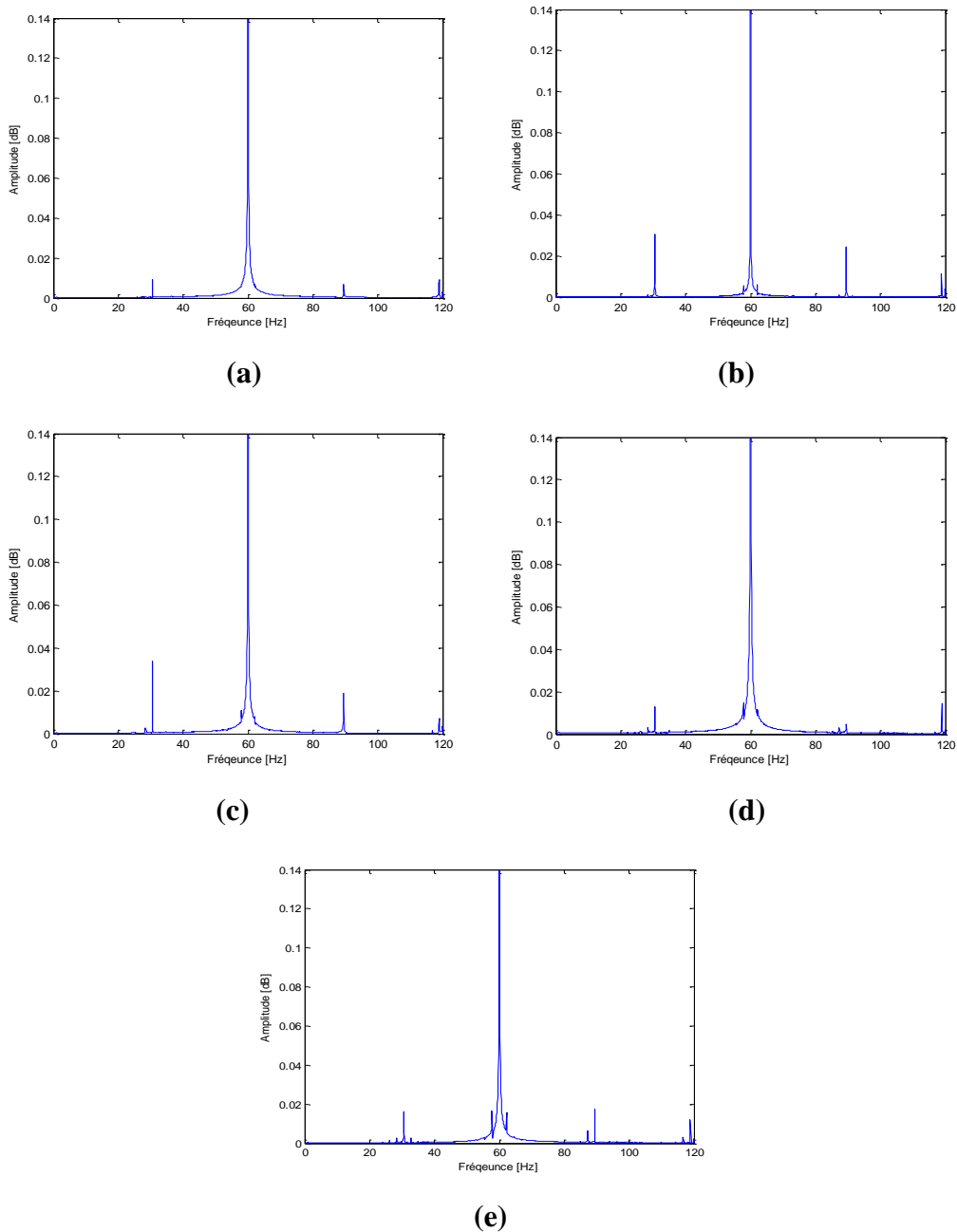
- Sans barre cassée (0 barre cassée) : Courant de 0.0095, montrant une réponse électrique relativement élevée à cette charge.
- Avec une barre cassée (1 barre cassée) : Courant de 0.005, indiquant une diminution significative par rapport au cas sain, suggérant une détection d'anomalie.
- Avec deux barres cassées (2 barres cassées) : Courant de 0.008, présentant une augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais restant relativement faible.
- Avec trois barres cassées (3 barres cassées) : Courant de 0.018, montrant une augmentation notable par rapport au cas avec deux barres cassées, avec des fluctuations significatives.
- Avec quatre barres cassées (4 barres cassées) : Courant de 0.019, indiquant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des défauts structurels persistants.

Ces résultats semblent suivre une tendance similaire aux charges précédentes, où une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de courant est observée. Cela suggère que l'analyse du courant continue d'être une méthode efficace pour détecter les défauts

des barres cassées dans les moteurs. Passons à la prochaine charge pour confirmer cette tendance.

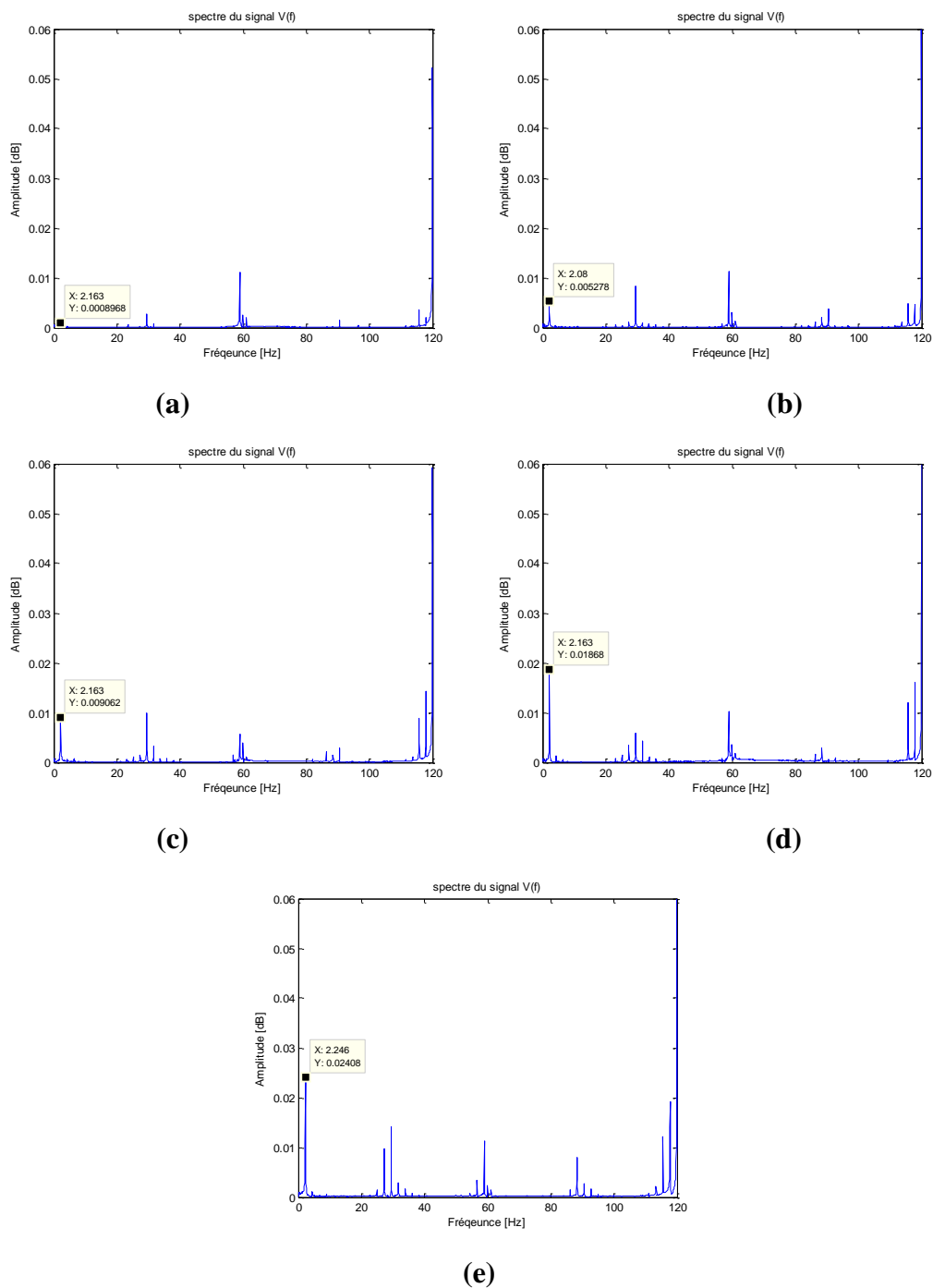
### IV.2.4. Analyse des courants mesurés à 20% de charge

#### IV.2.4.1. Spectre du courant



**Figure IV.07 :** Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 20%) :  
(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.4.2. Spectres d'enveloppe du courant



**Figure IV.08** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 20 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées



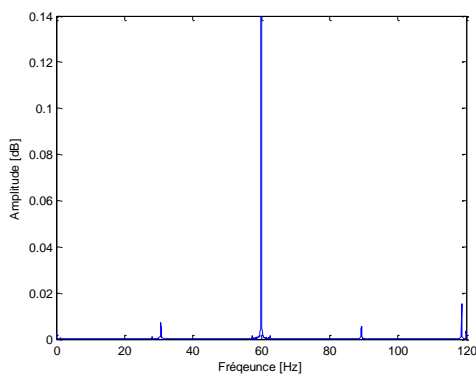
### IV.2.4.3. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (0 barre cassée) : Courant de 0.0089, montrant une réponse électrique relativement élevée à cette charge.
- Avec une barre cassée (1 barre cassée) : Courant de 0.005, indiquant une diminution significative par rapport au cas sain, suggérant une détection d'anomalie.
- Avec deux barres cassées (2 barres cassées) : Courant de 0.009, présentant une augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais restant relativement faible.
- Avec trois barres cassées (3 barres cassées) : Courant de 0.0186, montrant une augmentation notable par rapport au cas avec deux barres cassées, avec des fluctuations significatives.
- Avec quatre barres cassées (4 barres cassées) : Courant de 0.024, indiquant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des défauts structurels persistants.

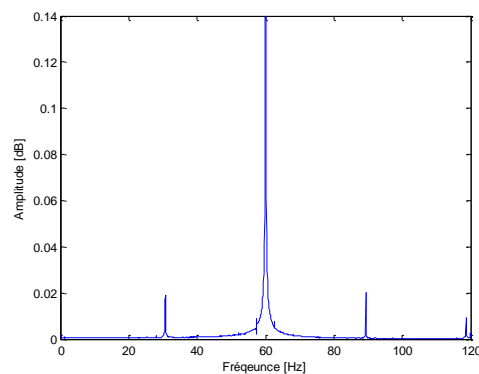
Encore une fois, nous observons une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de courant détectées. Cela confirme que l'analyse du courant semble être une méthode efficace pour détecter les défauts des barres cassées dans les moteurs, même à des charges plus élevées. Continuons avec la prochaine charge pour confirmer cette tendance.

### IV.2.5. Analyse des courants mesurés à 25% de charge

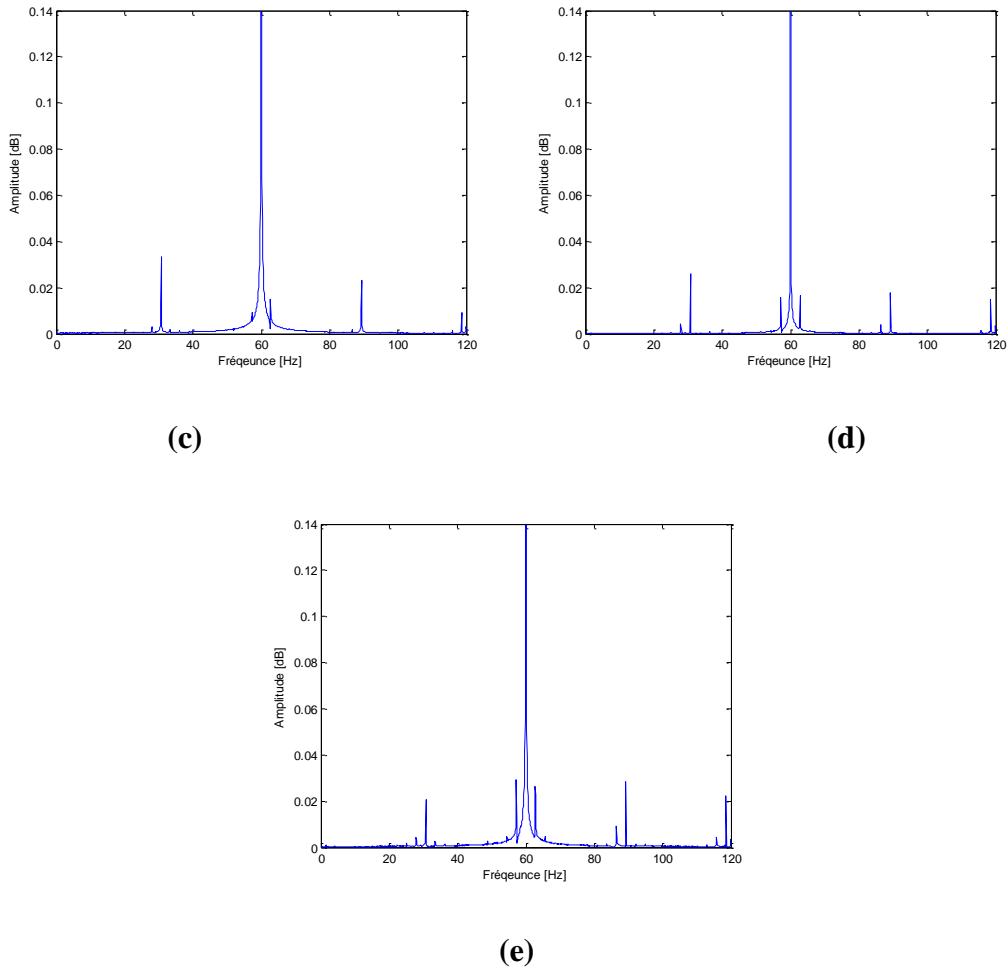
#### IV.2.5.1. Spectre du courant



(a)

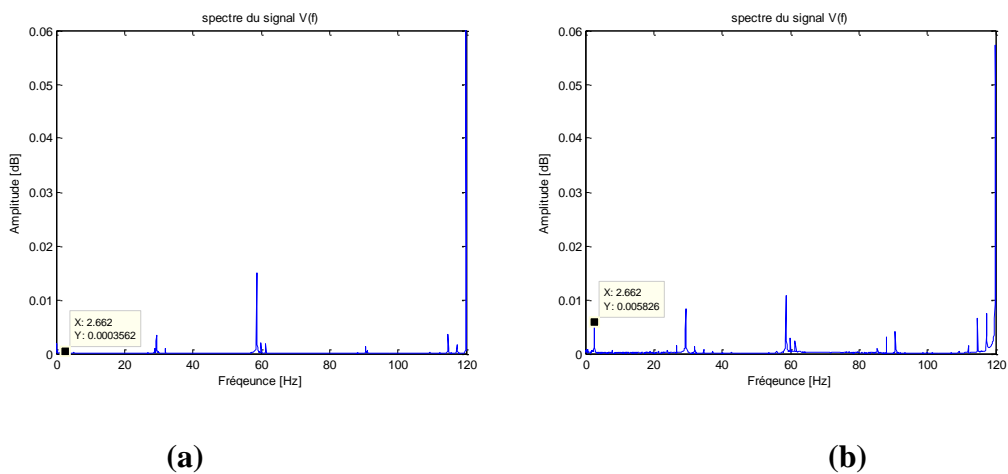


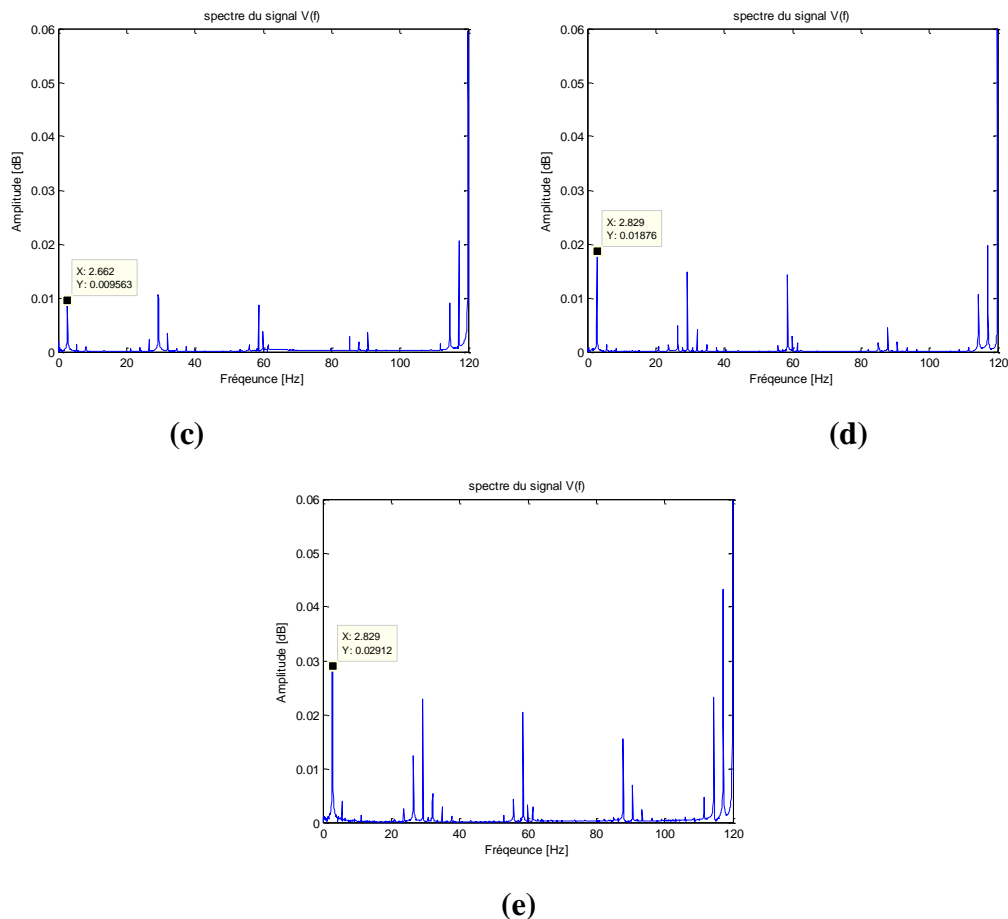
(b)



**Figure IV.09 :** Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 25%) :  
 (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.5.2. Spectres d'enveloppe du courant





**Figure IV.10** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 25 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.5.3. Interprétation des signaux

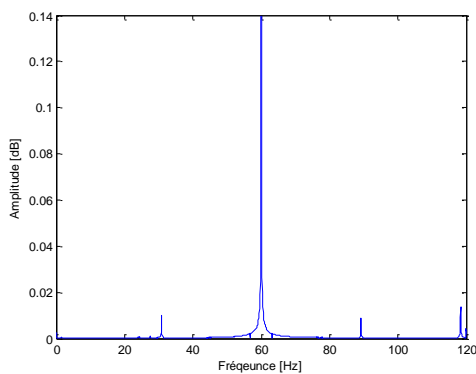
- Sans barre cassée (0 barre cassée) : Courant de 0.00035, montrant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Avec une barre cassée (1 barre cassée) : Courant de 0.005, indiquant une augmentation significative par rapport au cas sain, suggérant une détection d'anomalie.
- Avec deux barres cassées (2 barres cassées) : Courant de 0.009, présentant une augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais restant relativement faible.
- Avec trois barres cassées (3 barres cassées) : Courant de 0.018, montrant une augmentation notable par rapport au cas avec deux barres cassées, avec des fluctuations significatives.

- Avec quatre barres cassées (4 barres cassées) : Courant de 0.029, indiquant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des défauts structurels persistants.

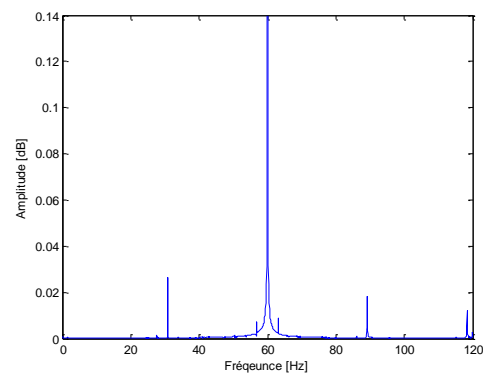
Encore une fois, nous observons une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de courant détectées. Cela renforce l'indication que l'analyse du courant semble être une méthode efficace pour détecter les défauts des barres cassées dans les moteurs, même à des charges plus élevées. Continuons avec la prochaine charge pour confirmer cette tendance.

### IV.2.6. Analyse des courants mesurés à 30% de charge

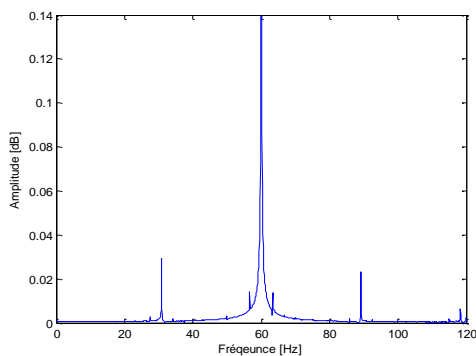
#### IV.2.6.1. Spectre du courant



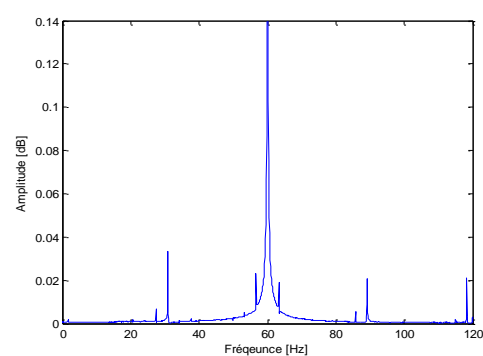
(a)



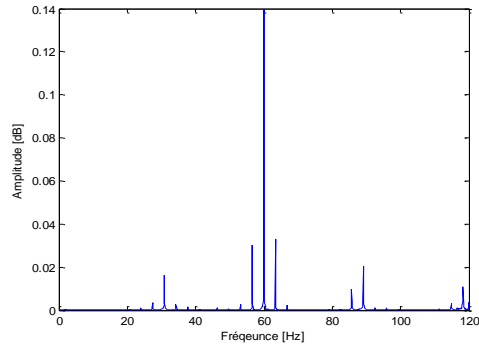
(b)



(c)



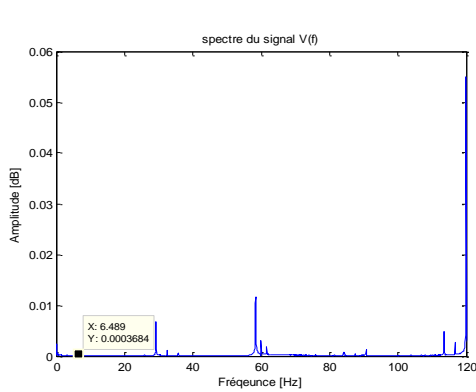
(d)



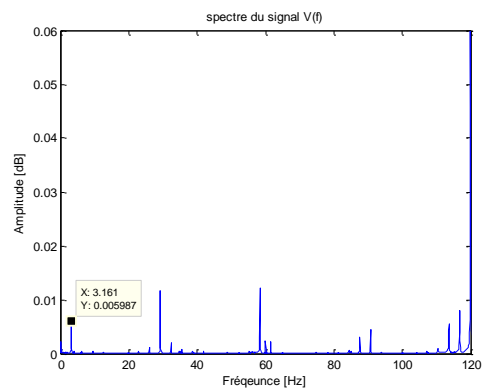
(e)

Figure IV.11 : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 30%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

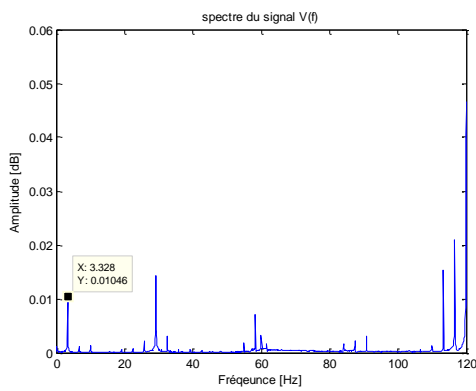
### IV.2.6.2. Spectres d'enveloppe du courant



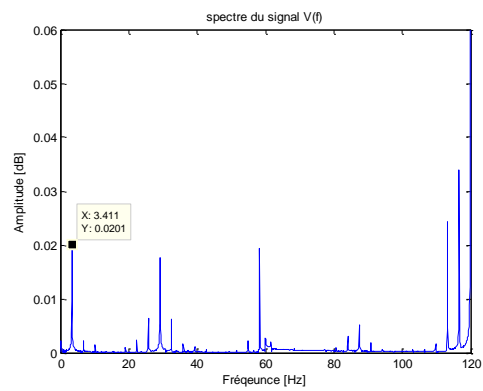
(a)



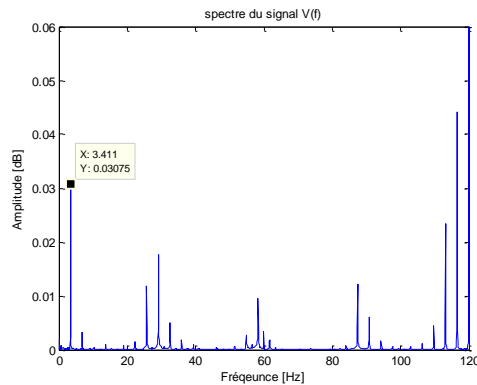
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure IV.12 :** Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 30 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

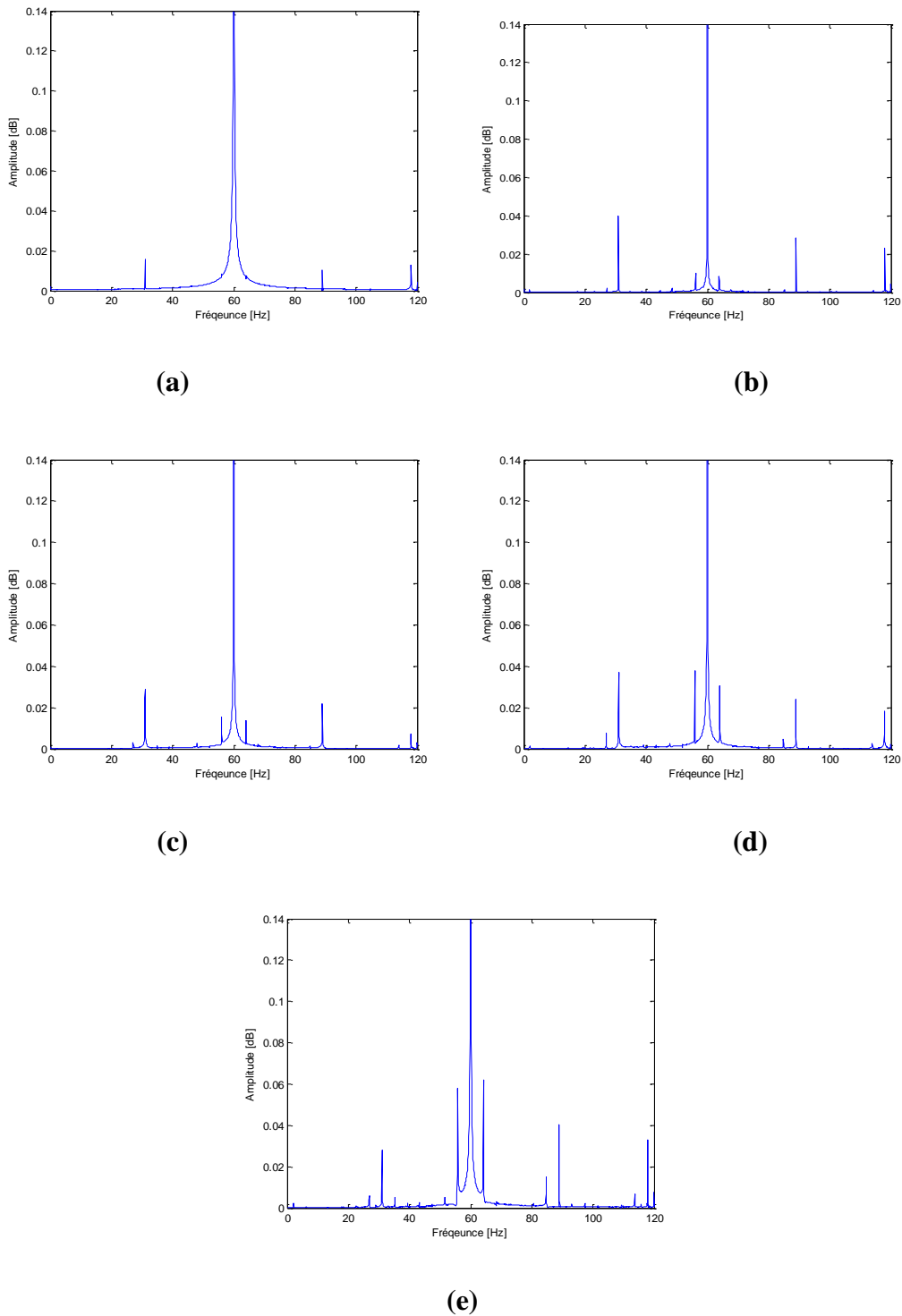
### IV.2.6.3. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (0 barre cassée) : Courant de 0.0003, montrant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Avec une barre cassée (1 barre cassée) : Courant de 0.0059, indiquant une augmentation significative par rapport au cas sain, suggérant une détection d'anomalie.
- Avec deux barres cassées (2 barres cassées) : Courant de 0.01, présentant une augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais restant relativement faible.
- Avec trois barres cassées (3 barres cassées) : Courant de 0.02, montrant une augmentation notable par rapport au cas avec deux barres cassées, avec des fluctuations significatives.
- Avec quatre barres cassées (4 barres cassées) : Courant de 0.03, indiquant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des défauts structurels persistants.

Encore une fois, nous observons une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de courant détectées. Cela confirme que l'analyse du courant semble être une méthode efficace pour détecter les défauts des barres cassées dans les moteurs, même à des charges plus élevées. Continuons avec la prochaine charge pour confirmer cette tendance.

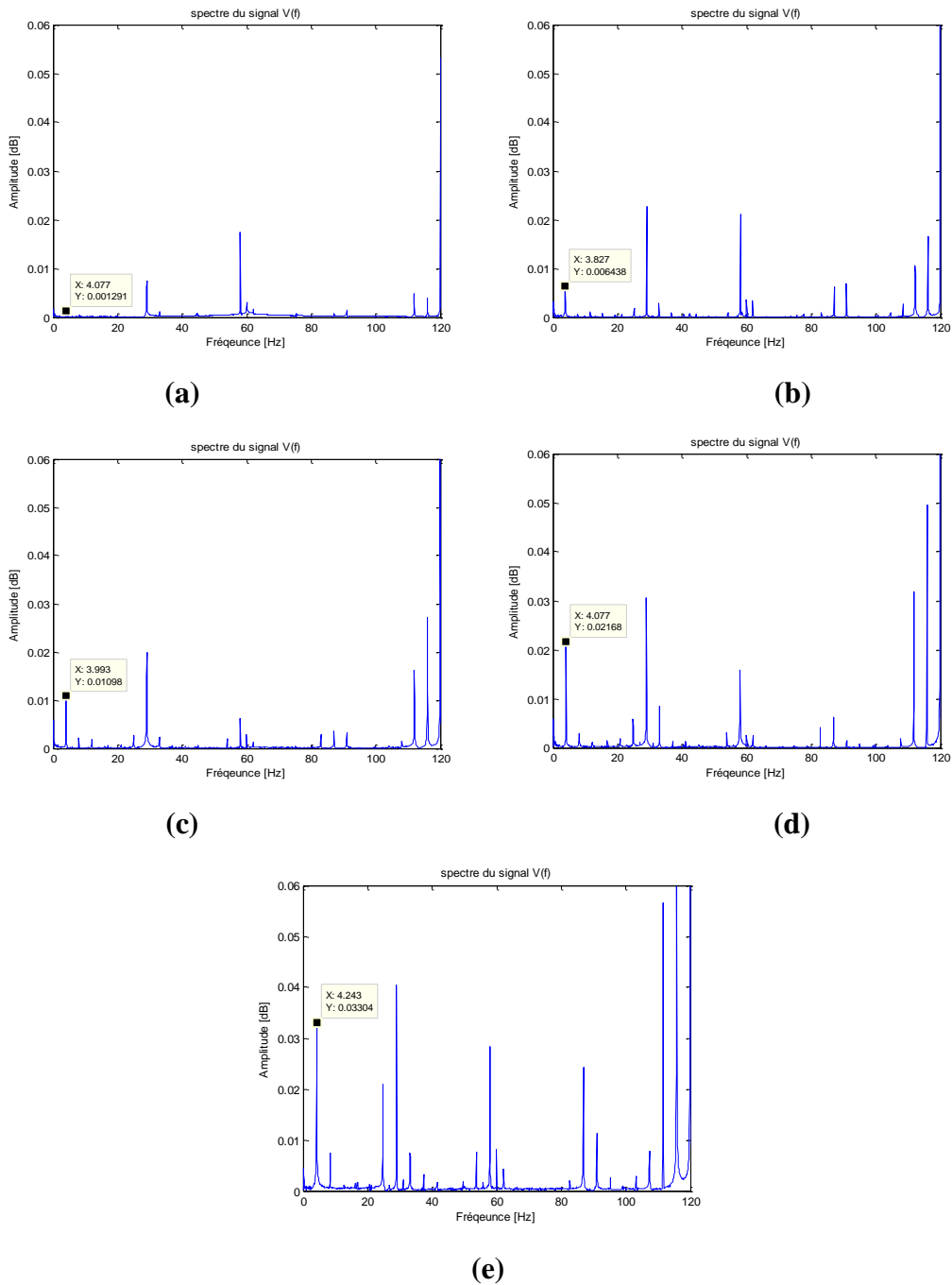
## IV.2.7. Analyse des courants mesurés à 35% de charge

### IV.2.7.1. Spectre du courant



**Figure IV.13** : Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 35%) :  
(a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.7.2. Spectres d'enveloppe du courant



**Figure IV.14 :** Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 35 %) : **(a)** sain, **(b)** 1 barre cassée, **(c)** 2 barres cassées, **(d)** 3 barres cassées et **(e)** 4 barres cassées



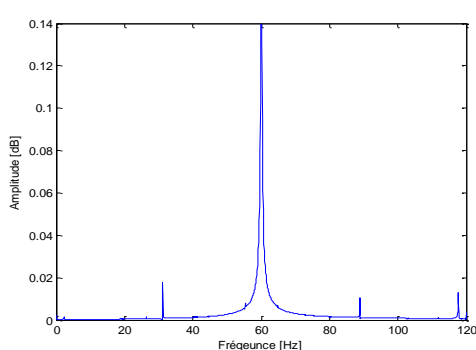
### IV.2.7.3. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (0 barre cassée) : Courant de 0.00129, montrant une réponse électrique relativement faible à cette charge.
- Avec une barre cassée (1 barre cassée) : Courant de 0.0064, indiquant une augmentation significative par rapport au cas sain, suggérant une détection d'anomalie.
- Avec deux barres cassées (2 barres cassées) : Courant de 0.01, présentant une augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais restant relativement faible.
- Avec trois barres cassées (3 barres cassées) : Courant de 0.02, montrant une augmentation notable par rapport au cas avec deux barres cassées, avec des fluctuations significatives.
- Avec quatre barres cassées (4 barres cassées) : Courant de 0.03, indiquant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des défauts structurels persistants.

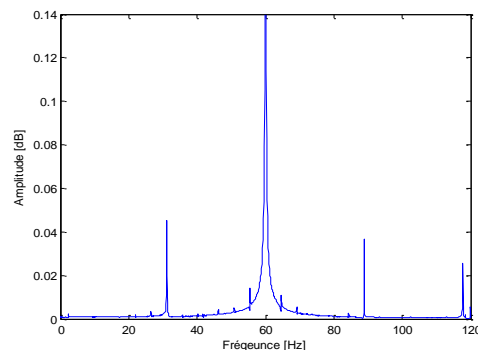
Comme précédemment, nous observons une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de courant détectées. Cela souligne l'efficacité continue de l'analyse du courant pour détecter les défauts des barres cassées dans les moteurs, même à des charges plus élevées. Continuons avec la prochaine charge pour confirmer cette tendance.

### IV.2.8. Analyse des courants mesurés à 40% de charge

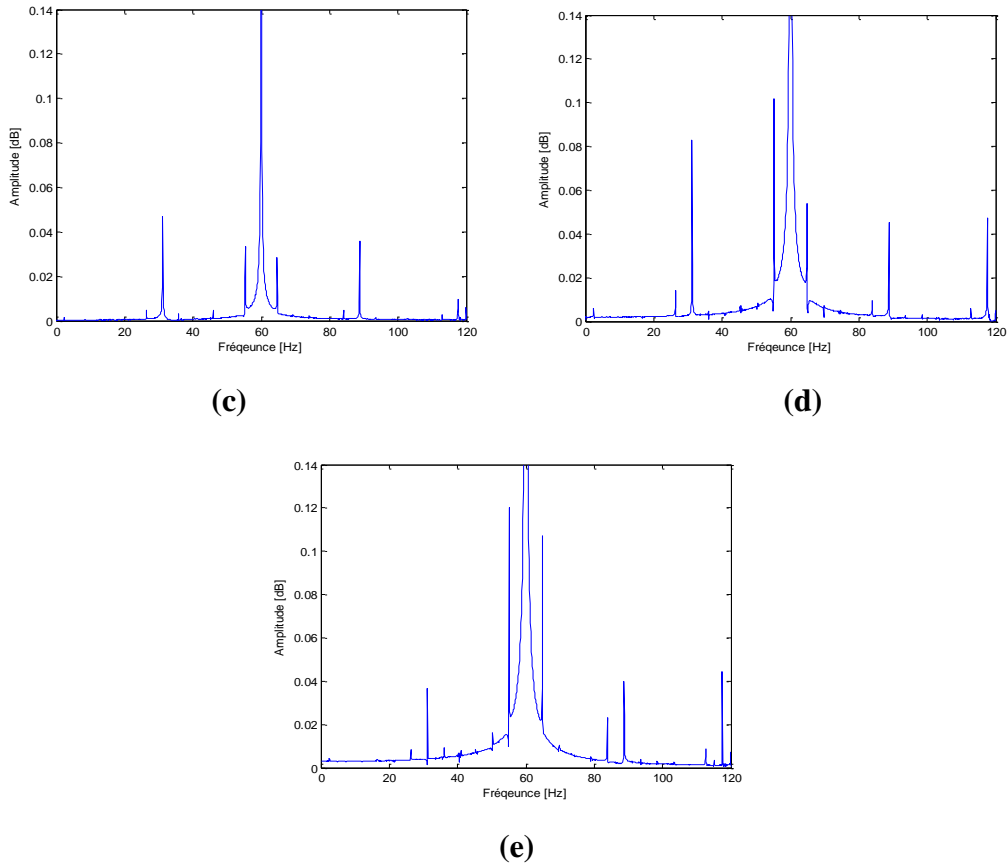
#### IV.2.8.1. Spectres du courant



(a)

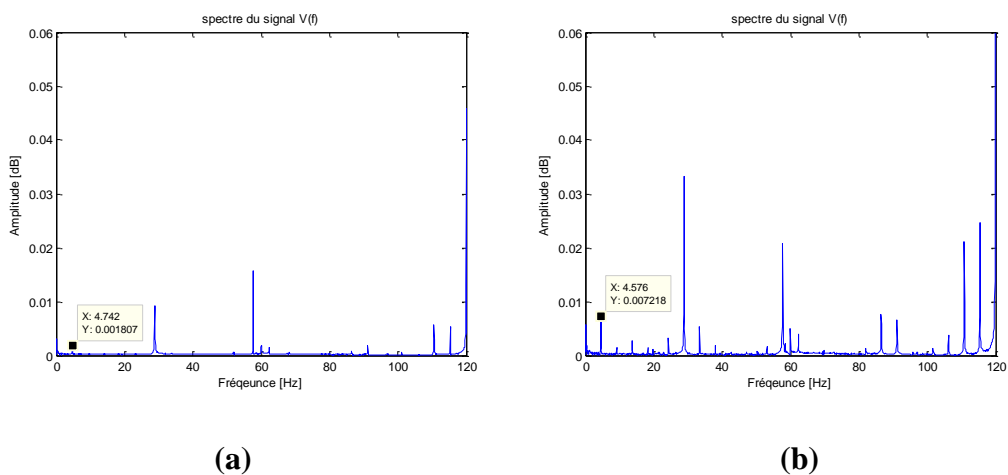


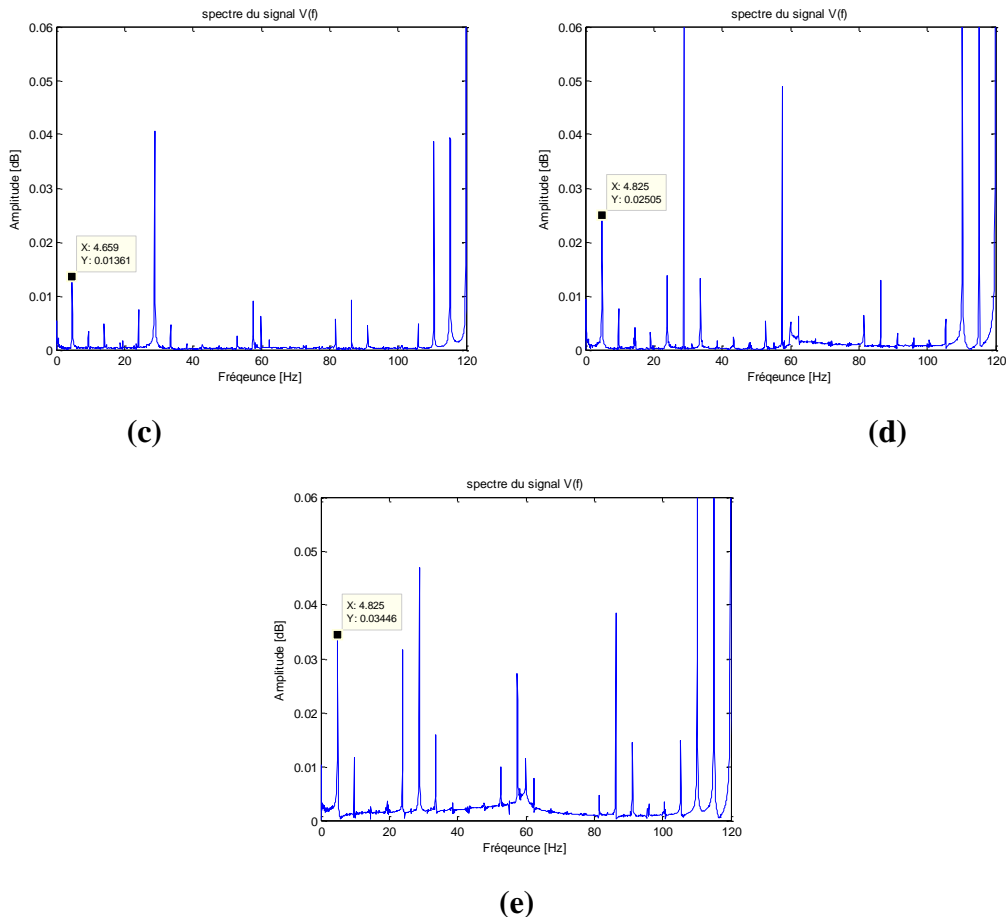
(b)



**Figure IV.15 :** Spectre du courant à différents nombres de barres cassées (Charge à 40%) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.8.2. Spectres d'enveloppe du courant





**Figure IV.16** : Spectres d'enveloppes de tension à différents nombres de barres cassées (Charge à 40 %) : (a) sain, (b) 1 barre cassée, (c) 2 barres cassées, (d) 3 barres cassées et (e) 4 barres cassées

### IV.2.8.3. Interprétation des signaux

- Sans barre cassée (0 barre cassée) : Courant de 0.018, montrant une réponse électrique relativement élevée à cette charge.
- Avec une barre cassée (1 barre cassée) : Courant de 0.007, indiquant une diminution significative par rapport au cas sain, suggérant une détection d'anomalie.
- Avec deux barres cassées (2 barres cassées) : Courant de 0.013, présentant une augmentation par rapport au cas avec une barre cassée, mais restant relativement faible.
- Avec trois barres cassées (3 barres cassées) : Courant de 0.025, montrant une augmentation notable par rapport au cas avec deux barres cassées, avec des fluctuations significatives.

- Avec quatre barres cassées (4 barres cassées) : Courant de 0.034, indiquant une augmentation significative par rapport au cas avec trois barres cassées, confirmant des défauts structurels persistants.

Encore une fois, nous observons une corrélation entre le nombre de barres cassées et les variations de courant détectées. Cela confirme que l'analyse du courant semble être une méthode efficace pour détecter les défauts des barres cassées dans les moteurs.

### IV.3. Récapitulatif des résultats

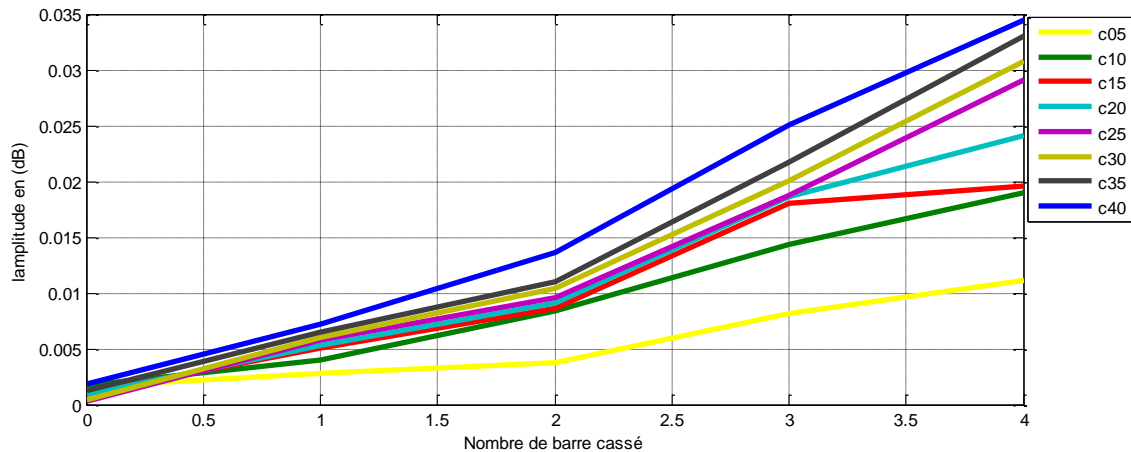
Le tableau ci-dessous montre les amplitudes à la fréquence démodulée ( $2g f_s$ ) des signaux de courant lors de la variation de la charge et le nombre de barres cassées au rotor. Ces données obtenues par analyse d'enveloppe des signaux du courant permettent une analyse approfondie des données.

**Tableau IV.01** : Tableau des amplitudes du courant des différentes charges en fonction des barres cassées à la fréquence ( $60+2g f_s$ ) Hz

charge en %	40	35	30	25	20	15	10	5
b0	0,01807	0,001291	0,0003684	0,0003562	0,008968	0,009524	0,001688	0,001646
b1	0,007218	0,006438	0,005987	0,005826	0,005278	0,005076	0,003978	0,00284
b2	0,01361	0,01098	0,01046	0,009563	0,009062	0,008637	0,008444	0,003765
b3	0,02505	0,02168	0,0201	0,01876	0,01868	0,01809	0,01435	0,00821
b4	0,03446	0,03304	0,03075	0,02912	0,02408	0,01961	0,01898	0,01115

Le graphe (**Figure IV.17**) montre les courbes des amplitudes du courant à la fréquence démodulée du défaut en fonction du nombre barres cassées afin de visualiser l'influence de la charge et la sévérité du défaut de cassure de barres. Ces résultats mettent en évidence une tendance significative, les amplitudes des défauts de cassure de barre augmentent de manière stricte avec le nombre croissant de barres cassées, et ce, pour différentes charges.

D'après l'analyse des spectres d'enveloppe du courant obtenus pour différents charges et nombres de barres cassées, il apparaît que les signaux sont croissants et précis pour le diagnostic des cassures de barres. Ces observations mettent en lumière les avantages de l'analyse du courant par rapport à l'analyse des vibrations et de la tension pour ce type de défaut.



**Figure IV.17 :** Variation de l'amplitude du courant à la fréquence démodulée du défaut ( $2gf_s$ ) pour différentes charges en fonction du nombre de barres cassées

### Conclusion

L'analyse du courant, dans le contexte spécifique étudié ici, révèle des tendances significatives liées à la présence de défaut de cassure de barres rotorique. À des charges croissantes, les observations montrent une augmentation progressive des amplitudes de pic dans le spectre de courant, ainsi que dans l'analyse de l'enveloppe du spectre, pour chaque cas de défaut.

Il est notable que même à des charges relativement faibles, comme 05%, des défauts peuvent être détectés dans l'analyse de l'enveloppe du spectre, alors que des charges plus élevées, telles que 40%, présentent des amplitudes de pic plus élevées, indiquant des défauts plus sévères nécessitant une intervention immédiate.

L'analyse de courant, appliquée sur un jeu de données expérimentales mesuré sur un moteur asynchrone, a illustré des résultats croissants et lisibles, facilitant grandement l'interprétation des données. Cette approche permet une compréhension approfondie du comportement des circuits électriques, offrant une vue claire sur l'efficacité énergétique et la détection d'anomalies. L'utilisation des outils classiques de traitement de signal du courant statorique s'est avérée efficace pour le diagnostic, la maintenance préventive et l'optimisation des systèmes électriques, garantissant ainsi la fiabilité et la performance des équipements.

---

# **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

Dans le milieu industriel, les systèmes de production sont de plus en plus complexes et ne peuvent être exempts de perturbations ou de défaillances et dans le cadre de l'analyse de la maintenance, il est primordial d'exploiter un ensemble de données de référence représentant l'état normal de la machine. Ainsi, toute variation ou symptôme identifié ultérieurement dépendra de cette base de données. Pour notre étude spécifique, les résultats de tests préalablement réalisés sur la rupture de quatre barres ont été exploités. Ces barres ont été soumises à des charges variables allant de 5% à 40%. Chaque cas de rupture a fait l'objet d'une documentation minutieuse afin d'établir une corrélation entre les niveaux de charge et les réponses observées.

L'objectif de ce travail est de contribuer à la surveillance de l'état de fonctionnement des moteurs industriels, comme les moteurs asynchrones. Le diagnostic des défauts de ces moteurs, est considéré comme une étape primordiale dans l'industrie. Pour cette raison, élaborer une meilleure technique est un sujet d'actualité. Les méthodes appliquées au domaine de diagnostic des machines tournantes sont nombreuses. Parmi elles, la méthode d'analyse des signatures du courant statorique, la méthode d'analyse de tension et enfin la méthode de l'analyse vibratoire en utilisant la transformée de Fourier et l'analyse d'enveloppe (Hilbert). La plupart des techniques de diagnostic de défaut sont destinées à identifier les défauts d'une manière précise. Cette étude présente trois techniques de détection de défaut permettant de sélectionner la méthode la plus appropriée en fonction du résultat recherché.

Pour le premier cas, l'analyse vibratoire, les signaux de vibrations extraits des bases de données fournies ainsi que ceux générés pour chaque cas présentent des caractéristiques intéressantes. Lorsque nous examinons les amplitudes des vibrations pour différentes charges et niveaux de barres cassées, nous constatons que les variations sont minimes et ne permettent pas une distinction claire entre les conditions normales et défectueuses. En synthétisant les amplitudes de chaque cas pour une comparaison globale, les signaux restent essentiellement aléatoires, rendant la détection des défauts difficile. Cependant, malgré cette uniformité apparente, une analyse plus approfondie des caractéristiques temporelles et fréquentielles des signaux pourrait révéler des informations subtiles qui pourraient être exploitées pour améliorer la sensibilité de la détection des barres cassées.

Pour le deuxième cas de l'analyse de tension, les résultats de l'analyse fréquentielle ont révélé des tendances presque identiques dans les spectres de fréquences pour toutes les

conditions testées, indiquant une homogénéité des caractéristiques fréquentielles des signaux. De même, lors de l'analyse d'enveloppe, les variations dans les enveloppes des signaux étaient cohérentes avec celles observées dans l'analyse fréquentielle, confirmant ainsi la similarité des tendances. Cependant, malgré ces analyses approfondies, les résultats ont montré une difficulté à distinguer clairement le type et la sévérité des défauts de barres cassées, en raison de l'uniformité des signaux et des variations aléatoires observées. Ces observations soulignent les défis rencontrés dans la détection précise des défauts de barres cassées à partir de l'analyse des signaux de tension.

Pour le troisième cas, de l'analyse de courant, les signaux de courant généraient présentent des caractéristiques spécifiques selon l'état des barres du rotor. En conditions normales, les signaux de courant peuvent montrer une certaine régularité avec des variations minimales. Cependant, en présence de barres cassées, ces signaux peuvent présenter des variations significatives, reflétant les perturbations du flux de courant à travers le moteur. Les amplitudes des signaux de courant pour chaque niveau de charge montrent une progression claire avec l'augmentation de la charge et la sévérité des barres cassées. Les signaux étaient clairs, faciles à interpréter, et montraient une tendance croissante. La différence entre chaque signal était notable, avec des amplitudes qui se distinguent les unes des autres de manière ordonnée et non aléatoire. L'analyse du courant s'est avérée très efficace pour détecter les défauts de barres cassées. Les fréquences caractéristiques et les amplitudes des signaux ont montré des variations significatives qui correspondent bien aux différents niveaux de défaut simulés. La sensibilité de cette méthode permet une détection précoce et précise des défauts.

En résumé, notre étude démontre que l'analyse de courant est la méthode la plus adaptée pour la détection des défauts de barres cassées aux rotors des moteurs asynchrones, surpassant les analyses de tension et de vibrations en termes de clarté des signaux, de fiabilité et d'efficacité. Les signaux de courant ont montré des variations significatives et croissantes correspondant aux différents niveaux de charge et sévérité de défauts, facilitant ainsi une identification précise. En revanche, les analyses de tension et de vibrations ont montré des limitations importantes, avec des signaux peu différenciés et souvent aléatoires, compliquant la détection des défauts.



---

# **BIBLIOGRAPHIE**

## Bibliographie

- [01] Boudjlat Walid et Himoura Abdelkader : Etude et simulation d'une machine asynchrone alimenter par un onduleur de tention à commande MLI. Mémoire Master de l'université de Badji Moukhtar Annaba 2012.
- [02] Gherbi Allel Et Abbad Abdellah : Commande d'un moteur asynchrone par la logique adaptive. Mémoire Master de l'université de Bouira 2016.
- [03] Bibi Zahra & Benmansour Fatma : Surveillance des vibrations des équipements industriels par voie d'induction électromagnétique. Mémoire Master de l'université d'Abdrahmane Mira de Bejaia 2014.
- [04] Hammi Sami et Benarabi Adel : Contribution au diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage d'écureuil par la méthode de la (MCSA). Mémoire Master de l'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2018.
- [05] Oulmane Abdelhak, Surveillance et diagnostic des défauts des machines tournantes dans le domaine temps-fréquences utilisant les réseaux de neurones et la logique floue, thèse de doctorat de l'école polytechnique de Montréal, Canada, 2014.
- [06] Benhacine Habib, Bellili Billal : Synthèse Des Techniques De Diagnostic Des Défauts DE La Machine Asynchrone. Mémoire Master de l'université d'Abdrahmane Mira de Bejaia 2019.
- [07] Bibi Zahra & Benlansour : Surveillance des vibrations des équipements industriels par voie d'induction électromagnétique. Mémoire Master de l'université d'Abdrahmane Mira de Bejaia 2014.
- [08] Khelfaoui Nabil : Diagnostique des defaurs de machines par l'analyse des signaux, Mémoire Master de l'université de Badji Moukhtar Annaba 2013.
- [09] Marcelo Suetake, Systèmes intelligents pour la surveillance et le diagnostic des défauts dans les moteurs à induction triphasés, thèse de doctorat de l'université de Sao Paulo, Brésil, 2012.

### Résumé

Les moteurs asynchrones sont largement utilisés en raison de leur coût inférieur par rapport à d'autres types de machines et de leur robustesse. Cependant, comme toute autre machine dans les chaînes de production où ils jouent un rôle stratégique, il est crucial de surveiller continuellement leur état pour assurer un fonctionnement non dégradé. En effet, une panne peut survenir à tout moment et entraîner des pertes significatives.

L'objectif de notre étude est de déterminer la méthode la plus fiable et efficace pour le diagnostic des défauts de cassure de barres du rotor à cage d'écureuil dans les moteurs asynchrones. Pour y parvenir, trois méthodes sont comparées : l'étude des signaux de vibration, de tension ou de courant basée sur l'analyse spectrale et l'analyse de l'enveloppe du signal. Les états de fonctionnement étudiés incluent : état sain, une barre cassée, deux barres cassées, trois barres cassées et quatre barres cassées.

**Mot clé :** Machine asynchrone, Cassure des barres rotorique, Analyse spectrale.

### Abstract

Asynchronous motors are widely used due to their lower cost compared to other types of machines and their robustness. However, like any other machine in production chains where they play a strategic role, continuous monitoring of their condition is crucial to ensure uninterrupted operation. Indeed, failures can occur at any time and lead to significant losses.

The aim of our study is to determine the most reliable and effective method for diagnosing rotor bar breakage faults in squirrel-cage asynchronous motors. To achieve this, three methods are compared investigating the vibration, voltage or current signals based on spectral analysis and the analysis of the signal envelope. The operational states studied include: healthy state, one broken bar, two broken bars, and four broken bars.

**Keywords :** Asynchronous machine, Failure of rotor bars, Spectral analysis.