



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
**Electrotechnique**  
**Commande Electrique**

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**Hamada Nacer-eddine**

Le : Dimanche 7 juillet 2019

## **Détection en ligne de défaut de court-circuit entre spires statoriques dans les Moteurs Asynchrones à Cage (MAS)**

---

### **Jury :**

Dr. <b>Khaled YAHIA</b>	Pr	Université de biskra	Président
Dr. <b>Salah Eddine ZOUZOU</b>	Pr	Université de biskra	Examineur
Dr. <b>Mohamed SAHRAOUI</b>	MCA	Université de biskra	Rapporteur



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Commande Electrique

---

Présenté et soutenu par :  
**Hamada Nacer-eddine**

Le : Dimanche 7 juillet 2019

## Détection en ligne de défaut de court-circuit entre spires statoriques dans les Moteurs Asynchrones à Cage (MAS)

---

Présenté par :  
**Hamada Nacer-eddine**

Avis favorable de l'encadreur :  
**Dr. Mohamed SAHRAOUI** *signature*

### Avis favorable du Président du Jury

Pr. Khaled YAHIA

*Signature*

**Cachet et signature**

## Résumé :

Dans ce sujet nous avons proposé une approche pour la détection online d'un défaut de court-circuit entre spires statoriques. Cette approche est basée sur l'analyse d'un ensemble des indicateurs définis à partir des impédances statoriques calculées via les amplitudes des harmoniques fondamentaux issus des courants et tensions statoriques. L'estimation et la suivi de l'évolution des différents indicateurs ont été réalisés à l'aide de la méthode FFT à fenêtre glissante qui offre la possibilité de l'implantation en temps réel. Les testes expérimentaux effectués et les résultats obtenus prouvent l'efficacité de l'approche proposée quant à la détection de défaut CCSP et la séparation entre la présence de ce défaut et un déséquilibre de tension.

## Mots clés :

Machine asynchrone, Diagnostique, transformation de Fourier rapide (FFT), court circuit entre spire statorique (CCSP), déséquilibre de tension.

## ملخص :

في هذا الموضوع اقترحنا منهجية تسمح لنا بالكشف المباشر للدائرة قصيرة بين لفات اللولبية للعضو الثابت للمحرك اللاتزامني. يعتمد هذا النهج على تحليل مجموعة من المؤشرات والمحسوبة من ممانعات للجزء الثابت المحسوبة هي أيضا عن طريق ساعات التوافقيات الأساسية الناتجة عن جهود والتيارات الجزء الثابت. تم إجراء تقدير ومتابعة مختلف والتي سمحت لنا بالتنطبق المباشر والفعلي. الاختبارات, المؤشرات باستخدام تقنية تحويلات فوري السريعة ذات نافذة متحركة التجريبية والنتائج التي تم الحصول عليها تثبت فعالية النهج المقترح فيما يتعلق بالكشف عن دائرة قصيرة بين اللفات اللولبية للعضو الثابت والفصل بين هذا العطب وبين عدم التوازن في جهد التغذية.

## الكلمات المفتاحية :

ماكنة لامتزامنة, تشخيص, تحويلات فوري السريعة, دائرة قصيرة بين لفات العضو الثابت, عدم التوازن في الجهد

## *DEDICACE*

*Je dédie ce modeste travail à tout ceux qui ont contribué de près ou de loin a la réalisation de notre projet ainsi je le dédie à :*

*A ma Chère Mère , source de tendresse*

*A mon Père , qui m'encourage*

*Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour.*

*A mon Frères et mes sœurs et toute la famille*

*A tous mes chers amis (es)*

*A tous ceux qui ont une bonne impression dans mon cœur,  
Comme signes d'amour et respect.*

*Hamada Nacer-eddine*

## *Remerciements*

Je remercie tout d'abord **ALLAH** de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme cette mémoire de master.

Je profite cette occasion pour exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de mémoire : Docteur **Mohamed Sahraoui**, pour leurs précieux conseils, leurs en couragements, leurs discussions techniques novatrices et pour me fournir toutes les facilités nécessaires tout au long de ce travail. Cela n'aurait pas été possible sans leurs motivations et leur soutien sans fin. Je remercie tous les membres du personnel enseignant et administratif du laboratoire de Modélisation des systèmes énergétiques de Biskra (**LMSE**) pour me fournir toutes les installations officielles et de laboratoire dans divers moyens d'achever cette mémoire. Je tiens également à remercier vivement les membres de jury : Monsieur **Salah Eddine ZOUZOU** Professeurs à l'Université de Biskra, Monsieur **Khaled YAHIA** Docteur a l'université de Biskra, aussi je remercie Monsieur **Khaled LAADJAL** pour son aide.

Enfin, je remercie tous mes collègues de laboratoire LMSE et LGEB, dont le soutien direct ou indirect m'a aidé dans la réalisation de cette mémoire.

Liste des figures

<b>Fig. I.1:</b> Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	1
<b>Fig. I.2</b> Enroulements statoriques d'une phase d'une machine à 4 pôles.....	2
<b>Fig. I.3</b> :Rotor à cage d'écureuil.....	2
<b>Fig. I.4:</b> Stator et Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.....	3
<b>Fig. I.5:</b> Applications des méthodes de maintenance.....	5
<b>Fig. I.6.</b> Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie.....	7
<b>Fig. I.7.</b> Représentation des différents défauts statoriques possible.....	8
<b>Fig. I.8.</b> Ouverture d'une phase.....	8
<b>Fig. I.9.</b> Court-circuit dans une phase.....	8
<b>Fig. I.10.</b> Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.....	9
<b>Fig. II. 1:</b> Représentation fréquentielle d'un signal temporel.....	13
<b>Fig. II.2</b> Les harmoniques TH.....	15
<b>Fig. II.3.</b> Les harmoniques de RSH.....	16
<b>Fig. II.4</b> Les harmoniques EFH.....	16
<b>Fig. II.5</b> Les harmoniques RBFH.....	17
<b>Fig. II. 6</b> : représentation d'un court-circuit entre spires d'une bobine statorique.....	18
<b>Fig. II. 7 : Fig. II. 7</b> :Spectre du courant : <b>a)</b> à l'état sain, <b>b)</b> avec court-circuit de 6 spires, <b>c)</b> avec déséquilibrée de 3.5%.....	20
<b>Fig. III.1</b> : Méthode de FFT à fenêtre glissante.....	23
<b>Fig. III.2</b> : Schémas simplifié montrant les prises réalisées pour faire des courts-circuits entre différents nombres de spires de phase c.....	23
<b>Fig. III.3</b> séquence direct.....	24
<b>Fig.III.4</b> : séquence inverse.....	25

## Liste des figures

---

<b>Fig.III.5</b> : séquence homopolaire.....	25
<b>Fig. III.6</b> :Schéma représentatif de la méthode proposée pour la détection de défaut de court-circuit entre spires statoriques.....	27
<b>Fig. III.7</b> : Le banc d'essai.....	28
<b>Fig. III.8</b> : capteur de courant.....	28
<b>Fig. III.9</b> :capteur de courant.....	28
<b>Fig. III.10</b> : Commutateur bidirectionnel permettant la commutation entre l'état sain et déséquilibrée.....	28
<b>Fig. III.11</b> :carte d'acquisition .....	28
<b>Fig. III.12</b> : Procédure d'acquisition, visualisation et enregistrement des signaux en utilisant LabVIEW.....	29
<b>Fig. III.13</b> schéma représentant l'implantation online de la méthode proposée .....	29
<b>Fig. III.14</b> les allures temporelles des courants et tensions statoriques à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.....	30
<b>Fig. III.15</b> : les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois courants statoriques à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.....	31
<b>Fig. III.16</b> : les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois tensions statoriques à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.....	32
<b>Fig. III.17</b> : les amplitudes des impédances statoriques estimées à l'état sain avec 6 spires en court-circuit.....	33
<b>Fig. III.18</b> : les amplitudes estimées des composantes symétriques correspondantes aux impédances statoriques à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.....	34
<b>Fig. III.19</b> : l'évolution de l'indice de déséquilibre estimé à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.....	35
<b>Fig. III.20</b> les allures temporelles des courants et tensions statoriques à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.....	36
<b>Fig. III.21</b> les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois courants statoriques à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.....	37

## Liste des figures

---

<b>Fig. III.22</b> les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois tensions statoriques à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.....	38
<b>Fig. III.23</b> : les amplitudes des impédances statoriques estimées à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.....	39
<b>Fig. III.24</b> : les amplitudes estimées des composantes symétriques correspondantes aux impédances statoriques à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.....	40
<b>Fig. III.25</b> : l'évolution de l'indice de déséquilibre estimé à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.....	41
<b>Fig. III.26</b> : les allures temporelles des courants et tensions statoriques à l'état sain puis avec variation brusque de charge.....	42
<b>Fig. III.27</b> les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois courants statoriques à l'état sain puis avec variation brusque de charge.....	43
<b>Fig. III.28</b> les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois tensions statoriques à l'état sain puis avec variation brusque de charge.....	44
<b>Fig.III.29</b> : les amplitudes des impédances statoriques estimées à l'état sain puis avec variation brusque de charge.....	45
<b>Fig. III.30</b> : les amplitudes estimées des composantes symétriques correspondantes aux impédances statoriques à l'état sain puis avec variation de charge.....	46
<b>Fig.III.31</b> : l'évolution de l'indice de déséquilibre estimé à l'état sain puis avec variation de charge.....	47
<b>Fig. III.32</b> : Evolution des différents indicateurs pour une séquence des évènements.....	49

*Liste des tableaux*

**Tableau I.1** : classification des défauts dans les machines électriques selon leurs origines.....6

**TAB II.1** les différents familles d'harmonique du courant statorique.....14

**LISTE DES ABREVIATIONS**

$s = g$  : le glissement dû au fondamental.

$N_b$  : Nombre de barres rotoriques de moteur asynchrone à cage.

$f_e$  : La fréquence d'échantillonnage.

$T_a$  : Le temps d'acquisition.

$N_e$  : Le nombre des échantillons.

$\Delta f$  : La résolution fréquentielle.

$f_{TH}$  : Les harmoniques du temps.

$f_{RSH}$  : Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH).

$f_{EFH}$  : Eccentricity Fault Harmonics (EFH)

$f_{RBFH}$  : Rotor Bar Fault Harmonics (RBFH).

$f_{PSH}$  : L'harmonique principal d'encoches rotoriques (PSH).

$P$  : Nombre de paires de pôles.

$f_r$  : La vitesse mécanique du rotor exprimée en Hertz.

$f_s$  : La fréquence fondamentale.

$v$  : L'ordre du temps harmonique.

$V_a$  : tension statorique simple de la phase « a ».

$V_b$  : tension statorique simple de la phase « b ».

$V_c$  : tension statorique simple de la phase « c ».

$V_d$  : composante symétrique directe de tension, calculée à partir des harmoniques fondamentaux des tensions d'alimentation.

$V_i$  : composant symétrique inverse de tension calculée à partir des harmonique fondamentaux des tensions d'alimentation.

$V_o$  : composant symétrique homopolaire de tension calculée à partir des harmonique fondamentaux des tensions d'alimentation.

## ***LISTE DES ABREVIATIONS***

---

Za :L'impédance statorique de la phase « a », calculée a partir des harmoniques fondamentaux des tensions et courants statoriques.

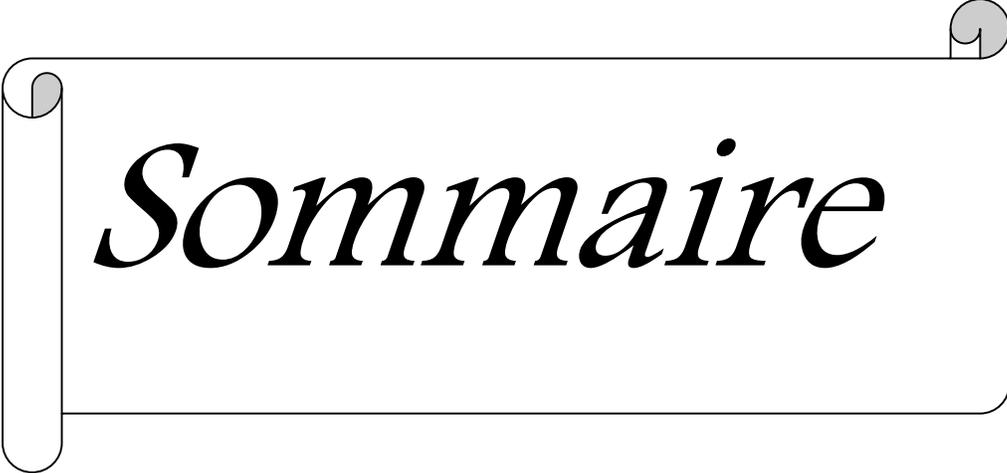
Zb :L'impédance statorique de la phase « b » calculée a partir l'harmonique fondamentaux des tensions et courants statoriques.

Zc :L'impédance statorique de la phase « c » calculée a partir l'harmonique fondamentaux des tensions et courants statoriques.

Zd :composante symétrique direct d'impédance calculée a partir des harmoniques fondamentaux des tensions et courants statoriques.

Zi :composante symétrique inverse d'impédance calculée à partir des harmonique fondamentaux des tensions et courants statoriques.

Zo :composant symétrique homopolaire d'impédance calculée à partir des harmonique fondamentaux des tensions et courants statoriques.



*Sommaire*

# Sommaire

---

Introduction générale .....	I
<b>Chapitre I: Généralité sur la Machine Asynchrone</b>	
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>I.2 Constitution de la machine .....</b>	<b>1</b>
<b>I.2.1 Le stator .....</b>	<b>1</b>
<b>I.2.2 Le rotor .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.3 Les organes mécaniques .....</b>	<b>2</b>
<b>I.3 La Maintenance.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3.1. Maintenance Corrective.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3.2. Maintenance Préventive.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.2.1 Maintenance préventive systématique.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.2.2. Maintenance préventive conditionnelle.....</b>	<b>4</b>
<b>I.4 Différents défauts dans la machine asynchrone.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.1. Défaut statoriques.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.2. Défauts rotoriques .....</b>	<b>8</b>
<b>I.5. Terminologies de diagnostic.....</b>	<b>9</b>
<b>I.5.1. Diagnostic.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5.2. La notion de la défaillance .....</b>	<b>9</b>
<b>I.5.3. Dégradation .....</b>	<b>10</b>
<b>I.6. Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone.....</b>	<b>10</b>
<b>I.6.1. Approche signal .....</b>	<b>10</b>
<b>I.6.2 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle .....</b>	<b>10</b>
<b>I.6.3. Approche modèle.....</b>	<b>11</b>

# Sommaire

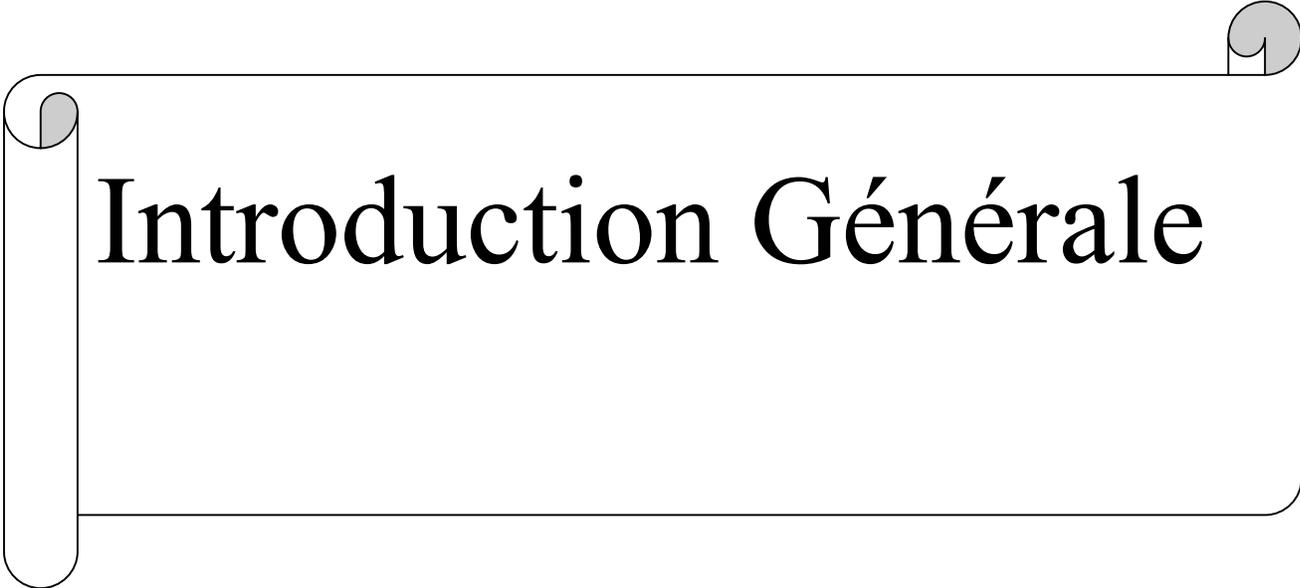
---

<b>I.7. Conclusion</b> .....	<b>11</b>
<b>Chapitre II</b> Contenne spectral de courant statorique .....	<b>II</b>
<b>II.1 Introduction</b> .....	<b>12</b>
<b>II.2 Analyse spectrale du courant statorique</b> .....	<b>12</b>
<b>II.3. Transformée de Fourier rapide (TFR)</b> .....	<b>12</b>
<b>II.4. Théorème de Shannon</b> .....	<b>13</b>
<b>II.5. Différentes familles d’harmoniques existant dans le spectre du courant statorique</b> ...	<b>14</b>
<b>II.6 Les différents harmoniques existant dans le courant statorique</b> .....	<b>14</b>
<b>II.6.1 Harmoniques du temps TH</b> .....	<b>15</b>
<b>II.6.2 Harmoniques d’encoches rotoriques RSH</b> .....	<b>15</b>
<b>II.6.3 Harmoniques de défaut d’excentricité (EFH)</b> .....	<b>16</b>
<b>II.6.4 Les harmoniques des défauts des cassures de barres RBFH</b> .....	<b>17</b>
<b>II.7. Etude de spectre du courant statorique avec défaut de court circuit entre spires</b> .....	<b>18</b>
<b>II.8. l’effet de court-circuit et déséquilibre de tension d’alimentation sur Spectre du courant</b> .....	<b>20</b>
<b>II.9. Conclusion</b> .....	<b>21</b>
<b>Chapitre III</b> <i>Détection défaut de court-circuit par l’analyse des impédances statoriques</i> .....	<b>III</b>
<b>III.1. Introduction</b> .....	<b>22</b>
<b>III.2. Estimation de la fréquence et l’amplitude en utilisant une fenêtre glissante</b> .....	<b>22</b>
<b>III.3. défaut de court circuit</b> .....	<b>23</b>
<b>III.4. Déséquilibre de tension d’alimentation</b> .....	<b>24</b>
<b>III.4.1 Composantes symétriques</b> .....	<b>24</b>
<b>III.5. Etude expérimentale</b> .....	<b>27</b>
<b>III.6. Impact du défaut de court-circuit sur ces indicateurs</b> .....	<b>30</b>
<b>III.7. Test de fiabilité des indicateurs</b> .....	<b>36</b>

# Sommaire

---

<b>III.7.1 l'effet de déséquilibre sur les indicateurs .....</b>	<b>36</b>
<b>III.7.2 l'effet de variation de la charge sur les indicateurs .....</b>	<b>42</b>
<b>III.7.3. Interprétation générale des résultats.....</b>	<b>47</b>
<b>III.8. Validité de la méthode proposée pour une séquence des événements .....</b>	<b>48</b>
<b>III.9. Conclusion.....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>III</b>

A decorative graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow. The scroll is unrolled, and the text is centered on the white surface. The top and bottom edges of the scroll are rounded, and the left edge has a vertical crease indicating the binding.

# Introduction Générale

## *Introduction générale*

La machine asynchrone, de part sa construction, est la plus robuste et la moins chère du marché. Cette machine est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse constante ou à vitesse variable. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les causes des défauts peuvent être dues à un simple problème de fabrication ou à une utilisation non conforme de la machine. Ceci a poussé la majorité des industriels à doter leurs chaînes de production par des systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic de défauts. Ces deux dernières fonctions ont pour objectif d'une part l'amélioration de la sécurité des êtres humains et des biens et d'autre part l'augmentation des gains de productivité résultant de l'accroissement de la disponibilité des équipements et d'une gestion efficace des opérations de maintenance. Un système de surveillance n'a pas pour vocation de remplacer l'homme mais pour l'aider dans sa prise de décision finale.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection Online de défaut de court-circuit entre spires statoriques dans la machine asynchrone à partir l'évolution en temps réel des impédances des enroulements statoriques. Cet outil d'analyse et diagnostic de défaut est basé sur l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier rapide à fenêtre glissante (FFTFG). Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en trois chapitres:

Le premier chapitre, est consacré sur l'état de l'art du diagnostic de défaut de la machine asynchrone. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différentes méthodes de détection et diagnostique de ces défauts sont représentés.

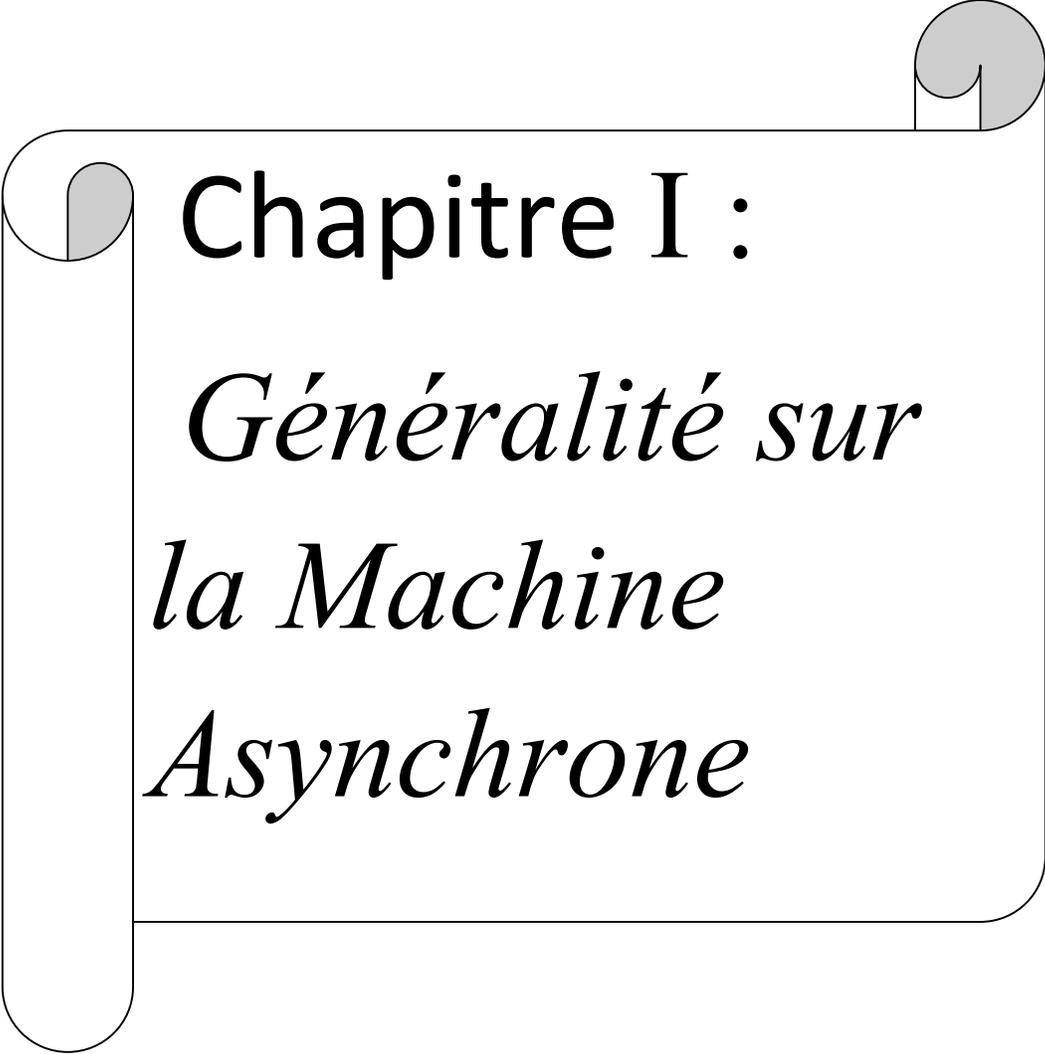
Le deuxième chapitre on a étudié le Contenu spectral de courants statoriques comme un méthode de diagnostique cet dernier qui a basée sur FFT. et en vu les quatre famille d'harmonique qui toujours existe dans le spectre et on a démontrons la limite cette méthode pour la détection le défaut de court-circuit.

Le troisième chapitre, dans cet chapitre on a utilisée la FFTFG comme une méthode pour l'estimation des impédances statoriques et les composantes symétriques, en suite l'évolution d'indice de déséquilibre de tension pour déduire un indicateur bien défini pour la détection de défaut de court-circuit entre spires statoriques et distinguer entre eux le déséquilibre de tension et variation de charge, toutes ces aspects sont validées expérimentalement.

## *Introduction générale*

---

A la fin de cet mémoire, nous pouvons conclure que les résultats expérimentaux de la méthode utilisée pour la détection de défaut de court-circuit entre spires dans la machine asynchrone donnent des résultats encourageants.



Chapitre I :

*Généralité sur  
la Machine  
Asynchrone*

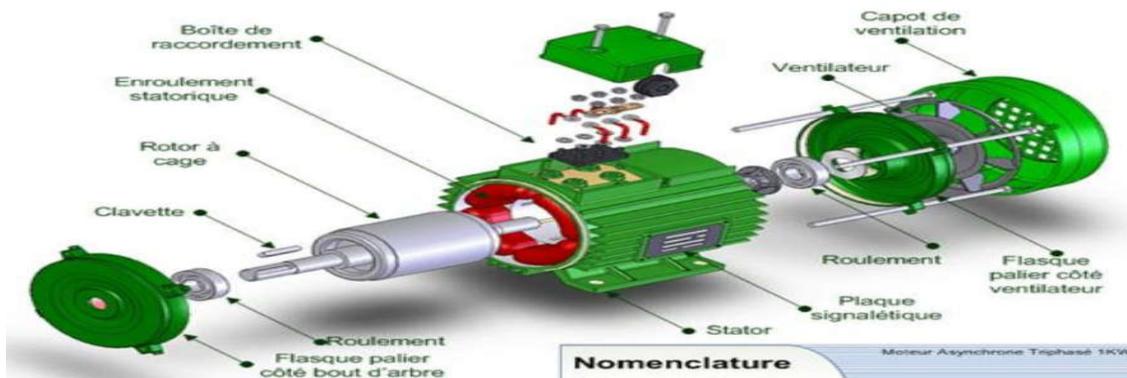
## I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous rappelons les éléments de constitution de la machine asynchrone, et les défauts pouvant survenir, ensuite les divers techniques de traitement pouvant être utilisés pour la détection d'un défaut électrique ou mécanique. A la fin, nous discutons les méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone.

## I.2 Constitution de la machine:

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments montrés sur la **Figure I.1**:

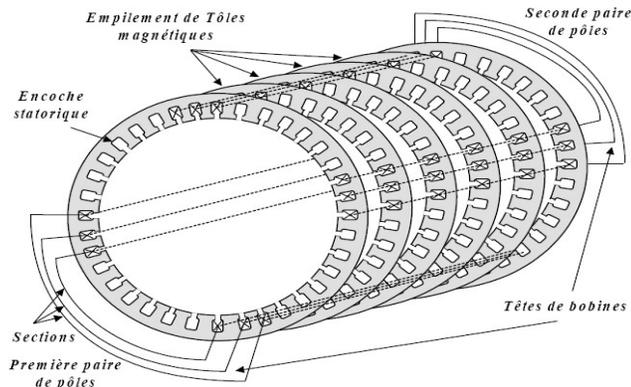
- Le stator est une partie fixe constituée de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Le rotor est la partie tournante constituée de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement.
- Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.



**Figure I.1**::Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

**I.2.1. Le stator :** Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Le circuit magnétique est schématisé en **Figure I.2**. Il est constitué d'un empilage de tôles minces découpées par des encoches parallèles à l'axe de la machine dont l'épaisseur varie entre 0÷50mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. Un bobinage statoriques peut être décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent

de créer dans l'entrefer le champ magnétique qui est à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant une circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre, afin d'obtenir une répartition sinusoïdale des forces magnétomotrices et du flux et limiter les ondulations du couple électromagnétique . [ROU09]



**Figure I.2** Enroulements statoriques d'une phase d'une machine à 4 pôles

**I.2.2. Le rotor :** Le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil. [ROU09]



**Figure I.3 :** Rotor à cage d'écureuil

**I.2.3. Les organes mécaniques :** La carcasse joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission comprenant une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement .Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé . Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent sa libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans

l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.[ROU09]



**Figure I.4:** Stator et Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.

### I.3. La Maintenance

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est « ensembles des activités destinées à maintenir ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise ». Il y a deux grandes classes de la maintenance :

- Maintenance corrective ;
- Maintenance préventive : - systématique .  
- conditionnelle .

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit

#### I.3.1. Maintenance Corrective

C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité.

### **I.3.2. Maintenance Préventive**

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc...). Les buts de la maintenance préventive, sont :

- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Diminuer le budget de la maintenance.
- Supprimer les causes des accidents graves.

On distingue deux types de la maintenance préventive :

#### **I.3.2.1 Maintenance préventive systématique**

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépoussiérage, calibrage,...). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système.

Généralement, la maintenance préventive systématique s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, des filtres, changement de la courroie de synchronisation, des roulements, des paliers de rotation ...).

#### **I.3.2.2. Maintenance préventive conditionnelle**

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable (température, vibration, jeu excessif, ...) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression...).

La maintenance préventive conditionnelle s'adresse aux pièces des machines coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillées par des méthodes non – destructives (vibration, huile, température, courant, etc.). Autrement dit, on ne change l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure affectant les performances du fonctionnement. La maintenance préventive

conditionnelle nécessite une équipe de maintenance de niveau technologique plus élevé formée en méthodes du diagnostic.. Les outils ou bien les signaux qui peuvent être utilisés par la maintenance préventive conditionnelle sont :

- mesure de température, thermographie infrarouge (lignage, roulements, paliers) ;
- mesures de pression (paliers) ;
- mesure de débit (paliers) ;
- analyse d'huile (roulements, paliers, engrenages) ;
- mesure de vibration (déséquilibre, lignage, roulements, paliers, engrenages, jeux, etc.)
- mesure du courant statorique, du couple, de la vitesse ou de la puissance.

D'après ces définitions, il apparaît donc que si un composant d'un système soit jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance corrective ; si celui-ci est jugé non défaillant mais en état dégradé, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance préventive. [SAH10].

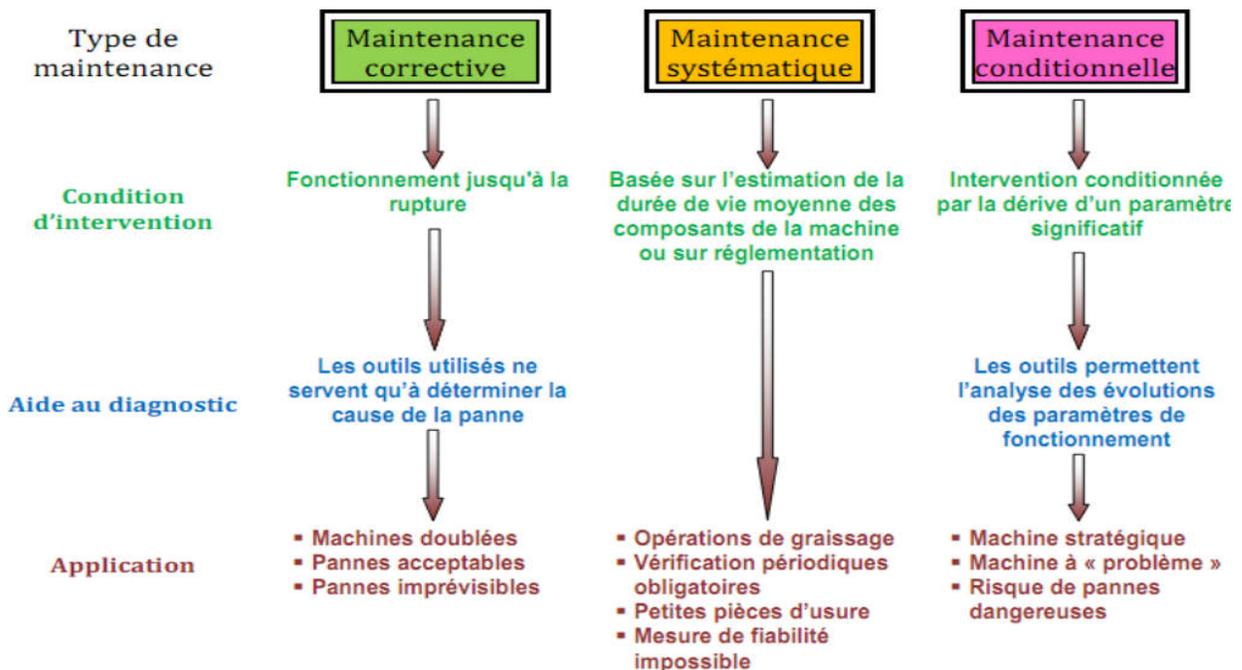


Figure I.5: Applications des méthodes de maintenance

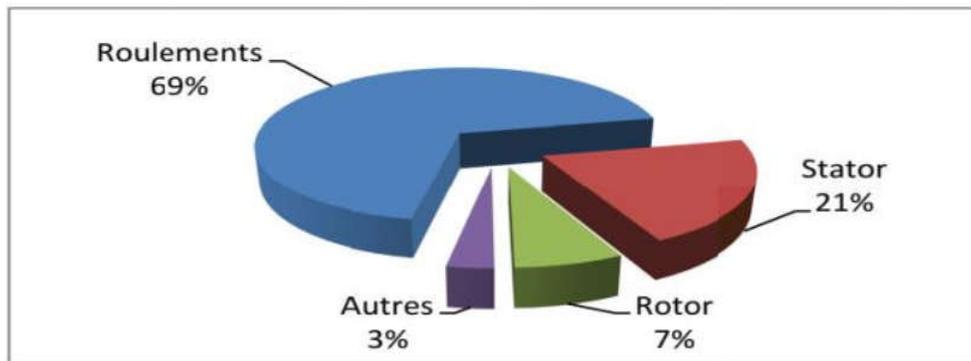
#### I.4. Différents défauts dans la machine asynchrone

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts des machines électriques, leurs origines et leur classification. Une défaillance de machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance. Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. [ TAL18]

Défaillance des machine électrique	Interne	mécanique	Contact entre le stator et le rotor
			Défaut de roulement
			Excentricité
			Mouvement des enroulement et des tôles
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Défaillance au niveau de circuit magnétique		
	Externe	mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			Température
			Propreté
Electrique		Fluctuation de la tension	
	Source de tension déséquilibrées		
	Réseau bruité		

Tableau I.1 : classification des défauts dans les machines électriques selon leurs origines.

Une étude statistique sur les machines asynchrones à cage d'écureuil, exploitées dans le domaine de l'industrie pétrochimique, nous révèle que certaines défauts sont plus fréquentes que d'autres comme exposé par le diagramme de les (figures I.6) en présentant le pourcentage de défauts susceptibles d'affecter ces machines de grande puissance.[ TAL18]



Figures I.6. Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie.

Cette répartition montre que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statorique, ceci est dû aux contraintes mécaniques plus importantes dans le cas de ces machines.

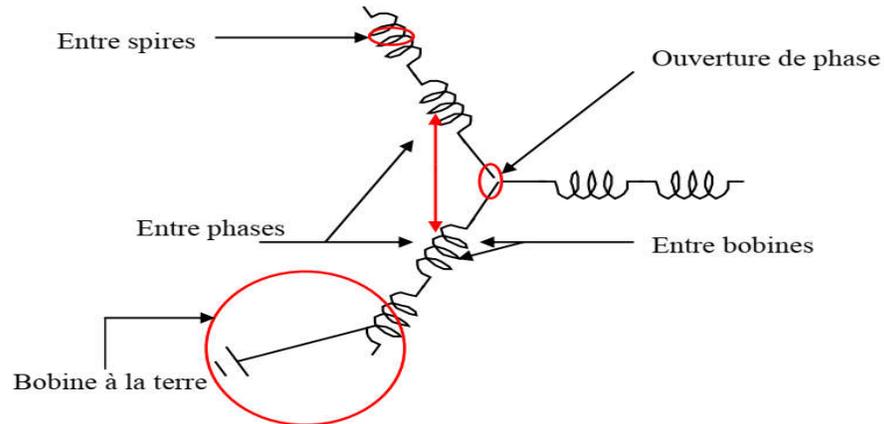
#### I.4.1. Défauts statoriques

Même si les vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélèrent l'usure des isolants, il reste que le facteur principal de vieillissement est l'échauffement anormal de bobinages. On peut citer :

- **Court-circuit entre phases** : Un court-circuit entre phases est un défaut front UI provoquerait un arrêt brusque de la machine.

**Court-circuit entre spire** : Un court-circuit entre spires de même phase ne conduit pas à un arrêt immédiat. Cependant, il provoque un déséquilibre dans phases statoriques, ce qui entraîne principalement une augmentation du courant statorique dans la phase affectée et une légère variation de l'amplitude sur les autres phases. Ce défaut a pour conséquence, une augmentation de la température au niveau du bobinage, et de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer de court-circuit dans les autres spires.

- **Circuit ouvert sur une phase** : Les conséquences d'ouverture de phase sont moins graves qu'un court circuit entre spires ou entre phases. Le courant ne peut pas circuler, et ça ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de bobinage.



Figures I.7. Représentation des différents défauts statoriques possible.



Figures I.8. Ouverture d'une phase

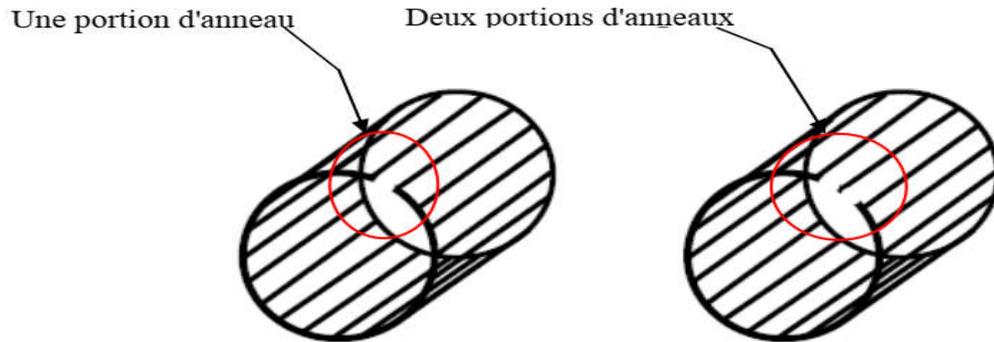


Figures I.9. Court-circuit dans une phase

#### I.4.2. Défauts rotoriques:

Malgré ses qualités, la machine asynchrone, peut présenter des défauts structurels parmi lesquels, la cassure totale ou partielle de barres ou des anneaux de court-circuit.

- Défauts de roulements.
- Défauts Excentricité (statique, dynamique et mixte).
- Cassures de barres rotoriques ou les anneaux de court-circuit rotorique.



**Figure I.10.** Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit

### I.5. Terminologies de diagnostic

Il semble intéressant, dans un premier temps, de rappeler quelques termes utilisés dans le diagnostic des systèmes.

#### I.5.1. Diagnostic

C'est un ensemble des actions destinées à identifier les causes probables de la défaillance. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation ait pour objet d'identifier le type de défaut [SAH10].

#### 1.5.2. La notion de la défaillance :

Définition de la défaillance selon la norme NF X 60 – 011 : « altération ou cessation d'un bien à accomplir sa fonction requise ».

Synonymes usuels non normalisés : « failure » (anglais), dysfonctionnement, dommages, dégâts, anomalies, avaries, incidents, défauts, pannes, détériorations.

Une défaillance peut être :

- Partielle : s'il y a altération d'aptitude du bien à accomplir sa fonction requise.
- Complète : s'il y a cessation d'aptitude du bien à accomplir sa fonction requise.

- Intermittente : si le bien retrouve son aptitude au bout d'un temps limité sans avoir subi d'action corrective externe.

### **I.5.3. Dégradation :**

État d'une entité présentant une perte de performances d'une des fonctions assurées par celle-ci ou alors un sous-ensemble lui-même dégradé, voire défaillant, sans conséquence fonctionnelle sur l'ensemble. On peut aussi parler de dérive.

## **I.6. Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone**

### **I.6.1. Approche signal**

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles des différents signaux issus des machines électriques tels que: les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal. Ces méthodes ont l'avantage d'être non affectée par une éventuelle erreur de modélisation. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral de ces signaux tels que : la FFT, les ondelette, la FFT glissante, Prony,...etc.

### **I.6.2. Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle**

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

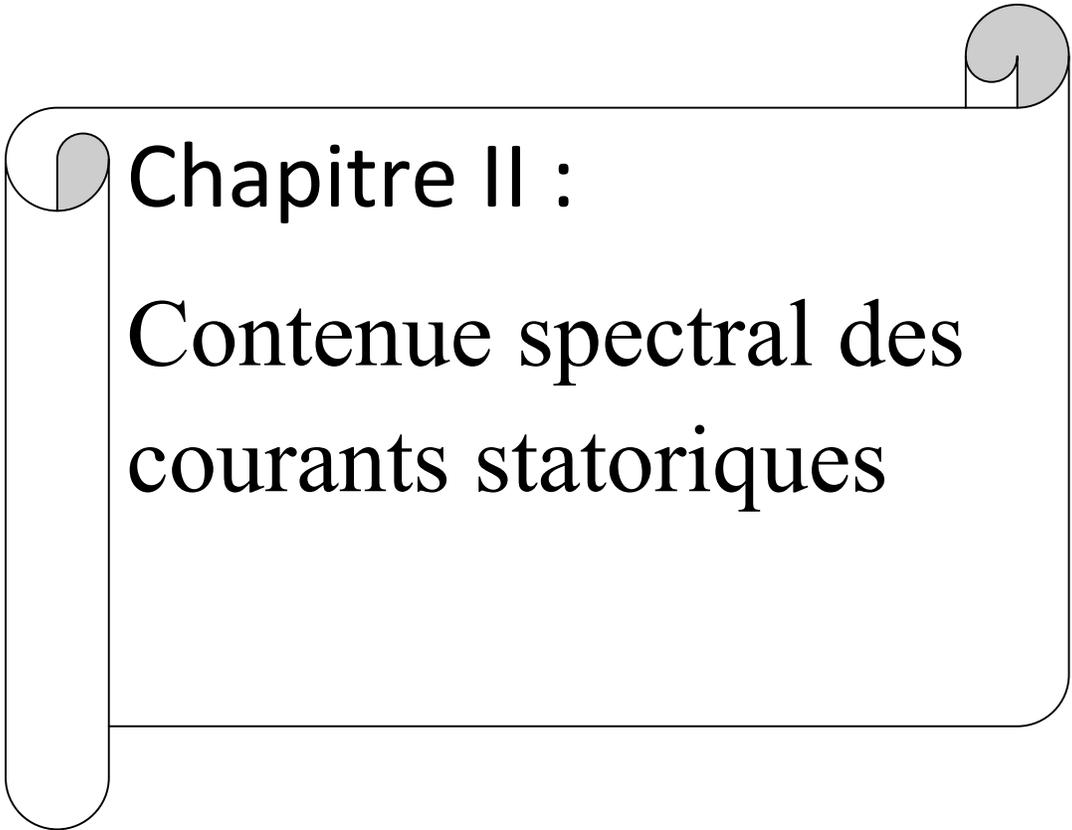
- ✓ logique floue,
- ✓ réseaux neuronaux,
- ✓ reconnaissance des formes.[SAD15]

**I.6.3. Approche modèle :**

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles peuvent s'appuyer sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié. La comparaison des paramètres mesurés représentant le fonctionnement du système et des paramètres calculés par les modèles (ou des paramètres estimés) permet la détection ainsi que l'identification de la défaillance susceptible de se produire. Ces techniques supposent la connaissance de la plage de variation de ces modèles et de leurs paramètres selon les conditions de fonctionnement du système [AME18].

**I.7. Conclusion**

Ce chapitre est un prétexte à la présentation des notions très importantes en diagnostic, la construction de la MAS, telles que les défauts qui peuvent affecter la machine asynchrone, leurs causes, leurs signatures et les grandeurs utilisées en diagnostic. Le chapitre suivant sera consacré au développement des méthodes de diagnostic des machines asynchrones.



Chapitre II :

Contenue spectral des  
courants statoriques

## II.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, il existe plusieurs méthodes de diagnostic des défauts dans les machines asynchrones. Cependant, dans ce travail, nous nous intéressons à la détection de défaut de court-circuit entre spires statoriques par l'approche signal. Plus précisément, nous allons utiliser l'analyse spectrale (via FFT) du signal de courant statorique. Pour cela et dans ce chapitre, nous allons étudier cette méthode et explorer le contenu spectral du courant statorique pendant l'état sain et avec défaut. Nous allons dévoiler aussi les inconvénients et les limites de cette méthode ainsi, nous allons proposer des issues pour résoudre les problèmes rencontrés afin d'arriver à un diagnostic fiable de ce type de défaut.

## II.2. Analyse spectrale du courant statorique :

L'analyse spectrale des signaux (grandeurs mesurables : les courants statoriques, les flux de fuites, le couple, la vitesse, les vibrations, la puissance,...) est l'approche la plus utilisée pour détecter les défauts électriques ou mécaniques dans les machines asynchrones.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, plusieurs phénomènes entrent en jeu pendant le fonctionnement du moteur asynchrone à cage et affectent essentiellement les courants d'alimentation en modifiant leurs formes. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les méthodes de traitement de signal. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques.

Parmi des méthodes la plus utilisées, on trouve la « Transformée de Fourier rapide » (TFR). Cette technique permet de décrire les signaux temporels par leurs spectres fréquentiels.

## II.3. Transformée de Fourier rapide (TFR) :

Considérons le signal  $x(t)$  à temps continu. Si  $x$  est d'énergie finie, sa transformée de Fourier rapide (TF) à la fréquence  $f$  est la suivante [YAH12]:

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

Son inverse est donnée par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f)e^{j2\pi ft} df \quad (\text{II.2})$$

Sa transformée de Fourier discrète (TFD) de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par :

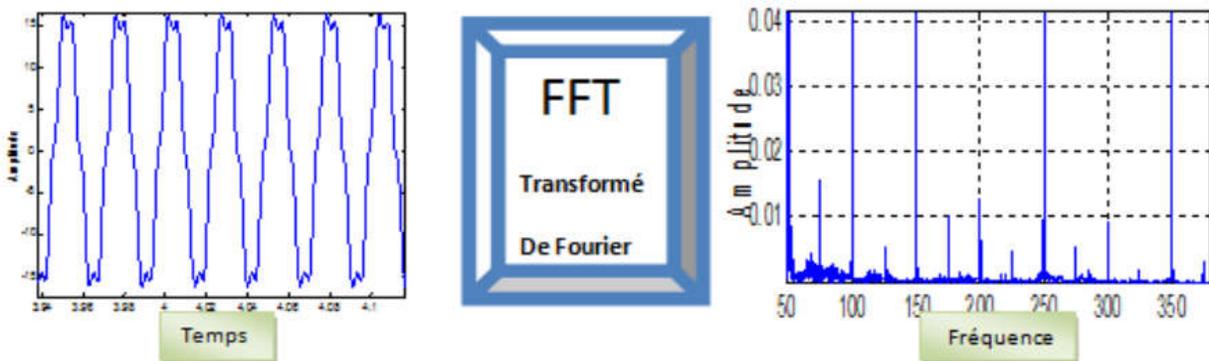
$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(kT) e^{-\frac{j2\pi f k T}{NT}} \quad (\text{II.3})$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{\frac{j2\pi f k T}{NT}} \quad (\text{II.4})$$

Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la FFT  $x(f)$  pour une valeur quelconque de la fréquence  $f$ . Donc, on ne calcule la FFT que pour des multiples  $\Delta f$ . C'est la notion de la Transformée de Fourier Discrète (DFT). En conséquence, la DFT  $x(n)$  d'un signal échantillonné est. Donne par :

$$x(n) = \sum_{k=1}^{Ne} x(k) e^{-j2\pi k \frac{n}{Ne}} \text{ avec } n=1, 2, 3, 4, 5 \dots Ne \quad (\text{II.5})$$



**Fig. II. 1:** Représentation fréquentielle d'un signal temporel

#### II.4. Théorème de Shannon :

Un signal  $x(t)$  peut être représenté de manière univoque par une suite de valeurs échantillonnées si la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  est au moins deux fois plus élevée que la plus grande des fréquences contenues dans le signal (échantillonner un signal sans pertes d'informations) .[MAB17]

### II.5. Différentes familles d'harmoniques existant dans le spectre du courant statorique :

Généralement, pour analyser un signal par la technique TFR, on doit prendre en compte les paramètres d'acquisition. Par exemple, les paramètres d'acquisition utilisés lors de nos essais expérimentaux sont les suivants :

- La fréquence d'échantillonnage :  $f_e = 10000$  Hz
- Le nombre des échantillons :  $N_e = 100000$  échantillons
- Le temps d'acquisition :  $T_a = N_e / f_e = 10$  sec
- La résolution fréquentielle:  $df = 1 / T_a = 1 / 10 = 0.1$  Hz

Il est important de noter que la résolution fréquentielle joue un rôle primordial quant à la clarté du spectre, elle doit être de faible valeur pour qu'on puisse séparer les harmoniques proches. [KHB15]

### II.6. Les différents harmoniques existant dans le courant statorique :

Une étude analytique détaillée qui a été effectuée dans [SAH 10] a identifié quatre types d'harmoniques qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique même à l'état sain. Le tableau II.1 présente les expressions générales des fréquences gouvernant chaque famille d'harmonique ainsi que leurs causes d'apparition.

Les différents harmoniques	Les formules globales	Les causes principales
Les harmoniques du temps (TH)	$TH = v.fs$	Ce type d'harmonique est imposé par le réseau électrique.
Harmonique de défauts d'excentricité (EFH)	$EFH = (v.fs \pm k.fr)$	Sont dus à un certain degré d'excentricité mixte résiduelle
Les harmonique d'encoche rotorique.(RSH)	$RSH = (v.fs \pm k.Nb.fr)$	Sont dus à la structure naturelle de la Machine asynchrone à cage .
Harmonique de défauts de cassure de barre (RBFH)	$RBFH = (v \pm 2 kg) fs$	Sont dus à l'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor.

**TAB II.1** les différents familles d'harmonique du courant statorique

### II.6.1 Harmoniques du temps TH :

Ce type d'harmonique est toujours excité, et imposée par la source ou réseaux d'alimentation et donner par l'expression fréquentiel suivant :

$$TH = v.fs \quad (II.6)$$

Spectre de courant statorique d'un moteur de 3kw à l'état sain de 100% de la charge nominal comme représenter dans la figure suivant :

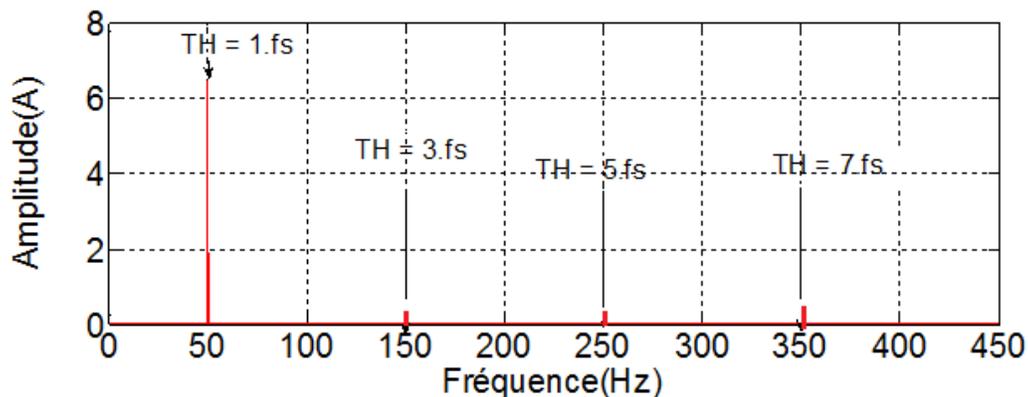


Fig. II.2 Les harmoniques TH

### II.6.2 Harmoniques d'encoches rotoriques RSH :

L'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique, des harmoniques dites d'encoches rotoriques ayant (RSH) pour fréquences  $[TH001]$ :

$$RSH = |(v.fs \pm k.Nb.fr)| \quad (II.7)$$

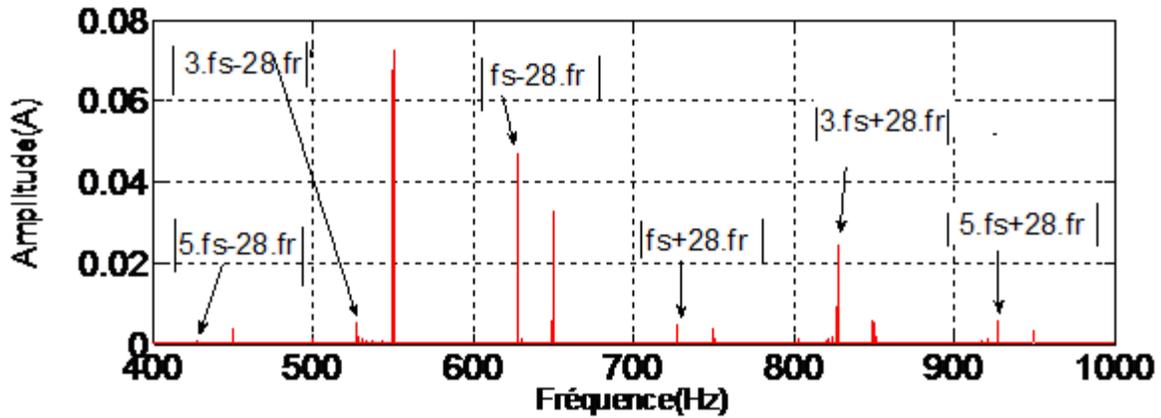


Fig. II.3. Les harmoniques de RSH

**Remarque :** Pour  $k=1$  et  $v=1$  on définit ce qui sont appelés 'harmoniques d'encoches principales (PSH).

### II.6.3 Harmoniques de défaut d'excentricité (EFH) :

L'excentricité du rotor, encore appelée excentricité de l'entrefer, non uniformité de l'entrefer ou bien désalignement. Les fréquences des bandes latérales autour de la fréquence d'alimentation sont donnée par:  $EFH = (v.fs \pm k.fr)$  (II.8)

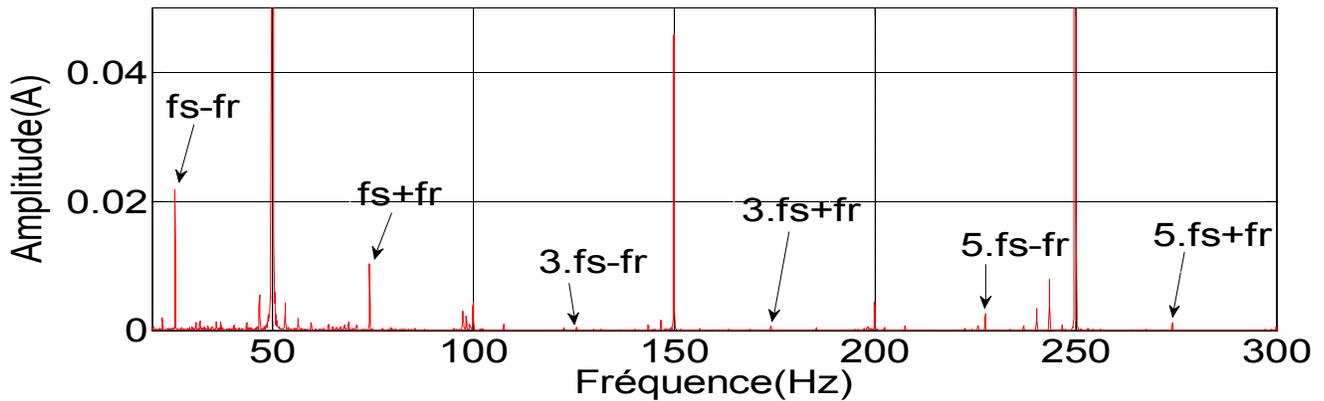


Fig. II.4 Les harmoniques EFH

### II.6.4 Les harmoniques des défauts des cassures de barres RBFH:

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasé symétrique, va être à l'origine d'un champ magnétique tournant inverse de fréquence ( $-gf$ ) dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence :  $f_{bc} = (1-2g)fs$ .

Cette fréquence provoque une modulation du courant, ce qui provoque des oscillations du couple donnant des fluctuations de la vitesse. Alors une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence :  $f_{2bc} = (1+2g)fs$ .

$$\text{donc : } f_{bc} = (1 \pm 2g) fs \quad (\text{II.9})$$

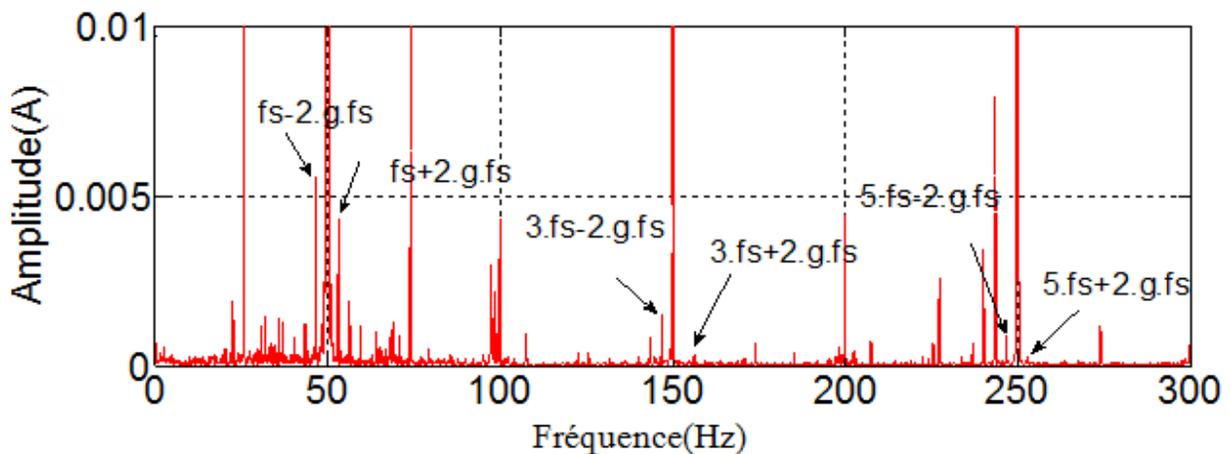


Fig. II.5 Les harmoniques RBFH

$fs$  = Est la fréquence d'harmonique fondamentale.

$fr$  = La fréquence du rotation rotorique.

$Nb$  : Nombre des barres rotorique.

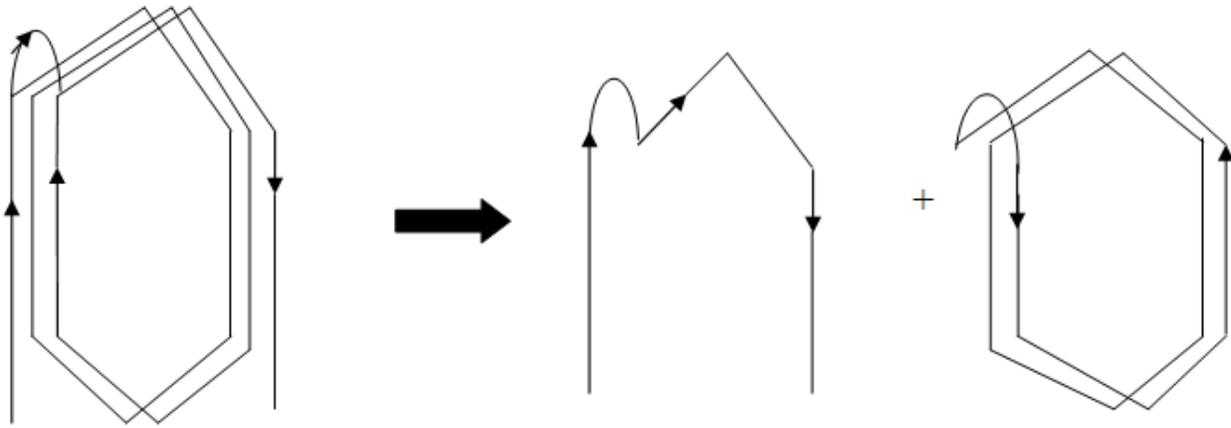
$K$  : Un entier positif.

$g$  : C'est le glissement de la machine asynchrone.

$v$  : Est à l'ordre du temps harmonique .

### II.7. Etude de spectre du courant statorique avec défaut de court circuit entre spires :

Le court-circuit entre spires des enroulements statoriques est un défaut largement rencontré dans l'industrie. Il apparaît généralement à cause des mauvaises conditions de fonctionnement ou vieillissement des isolants qui enrobent les conducteurs. Suite à un court circuit entre quelques spires d'une bobine statorique, il apparaît une maille supplémentaire constituée de spires court-circuitées, indépendante de la bobine d'origine (Figure II.6). Cette maille supplémentaire sera le siège d'une FEM (par conséquent un courant) créée par le champ dû à l'ensemble des enroulements statoriques et rotoriques qui l'entourent.



**Fig. II. 6 :** représentation d'un court-circuit entre spires d'une bobine statorique

Si on considère un court-circuit entre spires d'une bobine de la phase A, le nombre de spires de la maille supplémentaire sera très petit par rapport à celui de l'enroulement A. Par conséquent, le courant induit  $I_{cc}(t)$  de court-circuit aura une amplitude de grande valeur.

$$I_{cc}(t) = |\hat{I}_{cc} \sin(\omega st)| \quad (\text{II.10})$$

Ce courant est en opposition de phase par rapport à  $i_A(t)$ . En d'autres termes, ce défaut fait diminuer le nombre de tours de la phase concernée et par conséquent sa FMM. De ce raisonnement, on peut accepter que la FMM statorique résultante, dans le cas d'un défaut de court-circuit entre spires, soit égale à la différence entre la FMM statorique à l'état sain  $F_s^h(t, \theta)$  et celle  $F_s^n \cdot \text{maille.cc}(t, \theta)$  de la maille supplémentaire court-circuitée  $F_s^h \text{cc}(t, \theta) = F_s^h(t, \theta) - F_s^n \cdot \text{maille.cc}(t, \theta)$

$$\text{Avec : } F_s^n \cdot \text{maille.cc}(t, \theta) = N_e \cdot \text{maille.cc}(\theta) \cdot I_{cc}(t) \quad (\text{II.12})$$

Où  $N_e.\mathbf{maille.cc}(\theta)$  est la fonction d'enroulement de la maille supplémentaire court-circuitée. Pour un moteur à p paires de pôles, cette fonction calculée facilement.

$$N_e.\mathbf{maille.cc}(\theta) = \sum_{n=1} \frac{2ws.cc}{n\pi} \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \cos(np\theta) \quad (\text{II.13})$$

Avec  $n = k+1$  le rang des harmoniques dû à la distribution spatiale des spires court-circuitées dans les encoches statoriques.

Par conséquent, et selon les équations (II.10), (II.12) et (II.13), on obtient l'expression du terme général de la FMM générée par les spires court-circuitées :

$$F_s^n.\mathbf{maille.cc}(t, \theta) = \frac{2ws.cc.\hat{I}_{cc}}{n\pi} \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \cos(np\theta) \sin(wst) \quad (\text{II.14})$$

L'équation (II.14) représente l'expression d'un champ pulsant qui peut être décomposé en deux champs possédant la même fréquence temporelle mais l'un tourne dans le sens direct et l'autre dans le sens inverse :

$$F_s^n.\mathbf{maille.cc}(t, \theta) = \hat{F}_s^n.\mathbf{maille.cc} = [\underbrace{\cos(wst - np\theta)}_{\text{Directe}} + \underbrace{\cos(wst + np\theta)}_{\text{Inverse}}] \quad (\text{II.15})$$

Finalement, et selon les équations (II.11) et (II.15), on arrive à l'expression du terme générale de la nouvelle FMM créée par un bobinage statorique ayant un défaut de court-circuit entre spires [SAH10]

$$F_{s.cc}^{h,n}(t, \theta) = \hat{F}sh \sin(wst \pm hp\theta - \hat{F}_s^n.\mathbf{maille.cc} \cos(wst \pm np\theta)) \quad (\text{II.16})$$

Il est très clair que le défauts de court-circuit entre spires n'a pas des signatures spectrales spéciales dans le spectre de courant statorique.

II.8. l'effet de court-circuit et déséquilibre de tension d'alimentation sur Spectre du courant

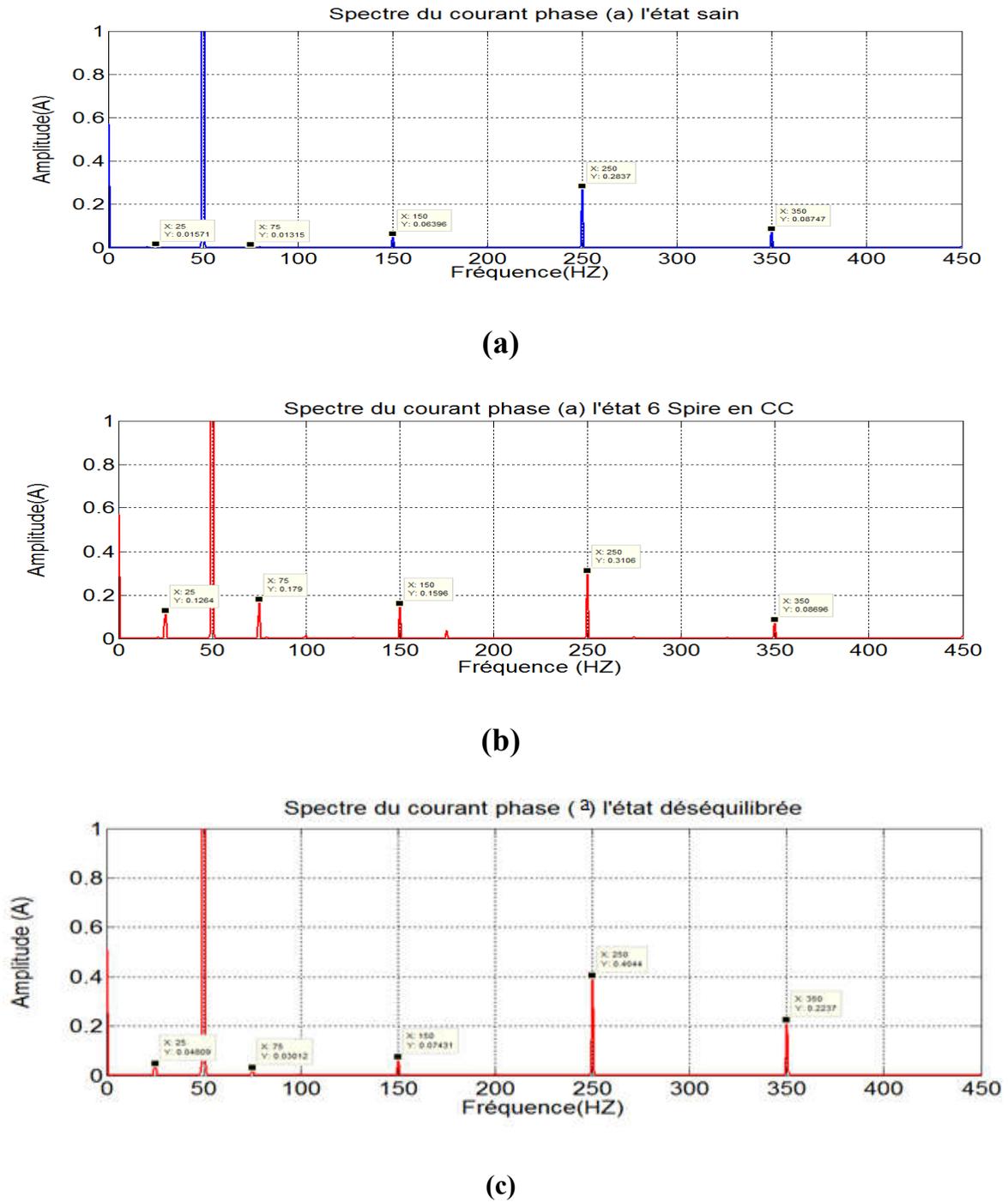
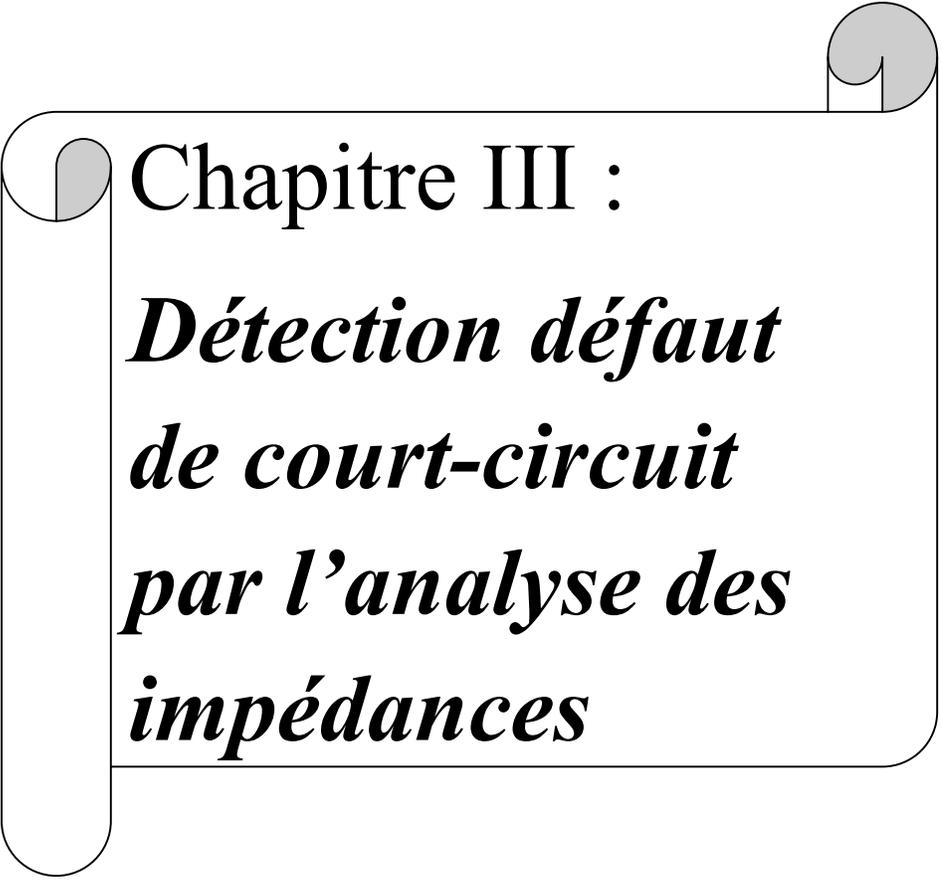


Fig. II. 7 :Spectre du courant : a) à l'état sain, b) avec court-circuit de 6 spires, c) avec déséquilibrée de 3.5%.

**Remarque :** Comme nous observons dans la figure (II.7), la présence d'un défaut de court-circuit entre spires statoriques, ou déséquilibre de tension d'alimentation donnent presque les mêmes effets sur le spectre de courant statorique.

### **II.9. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons vu une étude et montre la richesse de spectre du courant statorique en harmoniques sur tous les quatre types d'harmoniques (RSH,TH,RBFH,EFH), on a vu que le défauts de court-circuit n'a pas des signatures spectrales spéciales dans le spectre de courant ; c'est pour cette raison qu'on va proposer une nouvelle méthode basée sur l'analyse des impédances statoriques calculées à partir des harmoniques fondamentaux issus des tensions et courants statoriques. Cette méthode proposée sera l'objet du chapitre suivant.

A decorative scroll graphic with a white background and a black border. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards. The text is centered on the scroll.

Chapitre III :

*Détection défaut  
de court-circuit  
par l'analyse des  
impédances*

### III.1. Introduction

Nous avons parlé dans le chapitre précédent sur les harmoniques les plus connus dans le courant statorique et on a utilisé la FFT comme une méthode d'estimation et on a prouvé la limite de la FFT pour la détection de défaut de court-circuit entre spires. Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'utilisation de la méthode de **FFT à Fenêtre Glissante (FFTFG)**, qui permet d'estimer et de suivre les amplitudes et les fréquences ainsi que les angles de déphasage de n'importe quelle composante fréquentielle issus des signaux des courants et tensions statoriques. Ces avantages offerts par la FFT glissante donne la possibilité d'estimer et de suivre l'évolution des impédances statoriques ainsi que les composantes symétriques relatives aux impédances statoriques et les tensions d'alimentation. *L'objectif principal est de définir un ensemble des indicateurs fiables permettant de détecter la présence d'un défaut de court-circuit entre spires et en particulier de distinguer entre ce défaut grave et celui dû à un défaut de déséquilibre de tension d'alimentation ou de variations brusques dans la charge.*

### III.2. Estimation des fréquences et d'amplitudes en utilisant la FFTFG :

Pour éviter les handicaps de la technique FFT classique, nous avons proposé l'utilisation de la méthode FFTFG. Cette méthode est basée sur le choix d'une courte fenêtre sur laquelle on applique la FFT d'une manière continue, ce qui permet d'estimer la fréquence et l'amplitude et l'angle de déphasage de l'harmonique désiré (le fondamental dans notre cas) à partir des signaux des courants et des tensions statoriques. De plus, la méthode FFTFG permet de suivre les grandeurs à estimer même pour des signaux non-stationnaires. [LAA 18]

Le choix de la taille de cette fenêtre est une tâche critique, on doit trouver un compromis entre la rapidité et la précision. Il est important de noter que la taille de la fenêtre glissante n'est pas fixe, en fait, son choix nécessite des tests préliminaires. Dans notre cas, nous avons trouvé qu'une fenêtre de 25000 échantillons est suffisante pour avoir de bons résultats. Il est à noter que le minimum des échantillons qu'on peut l'utiliser est 10000 échantillons. Si on part au-dessous de ce nombre, l'algorithme devient plus rapide mais on perdra la précision des résultats parce que la résolution fréquentielle se dégrade dramatiquement.

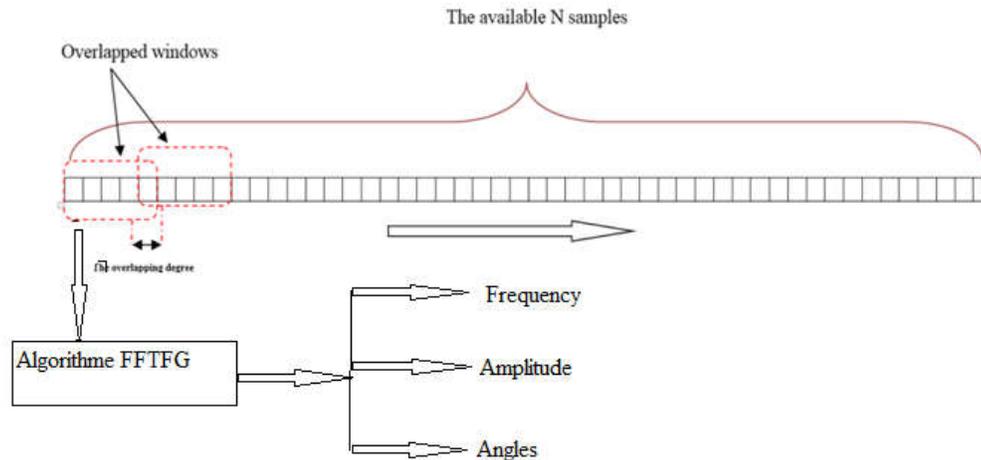


Fig. III.1 : Méthode de FFT à fenêtre glissante

### III.3. défaut de court circuit :

Le même banc d'essai est utilisé pour étudier expérimentalement le défaut de court-circuit entre spires. Pour émuler un défaut réel de court-circuit entre spires, une machine de 3kW a été spécialement rembobinée afin de rajouter des prises supplémentaires. Deux bornes intermédiaires au niveau des phases (a –b–c) ont été sorties dans différents points. Ces bornes ont été reliées à la plaque à bornes pour pouvoir introduire des courts-circuits d'un nombre donné de spires (Fig.III.2)

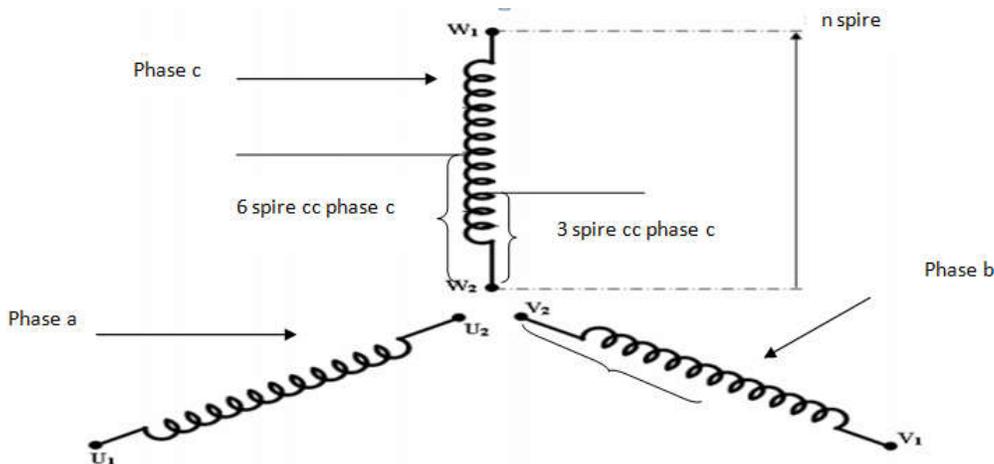


Fig. III.2 : Schémas simplifié montrant les prises réalisées pour faire des courts-circuits entre différents nombres de spires de phase c

### III.4. Déséquilibre de tension d'alimentation :

#### III.4.1. Composantes symétriques :

Tout système triphasé déséquilibré peut être décomposé en une somme d'un système direct, d'un système inverse et d'un système homopolaire. [GAB]

##### a. Système direct :

Le système direct est un système triphasé équilibré de séquence directe (abc), comme

Fig. III.3

système direct :  
$$\begin{bmatrix} V_{da} \\ V_{db} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ a^2 V_d \\ a V_d \end{bmatrix} \quad (III.1)$$

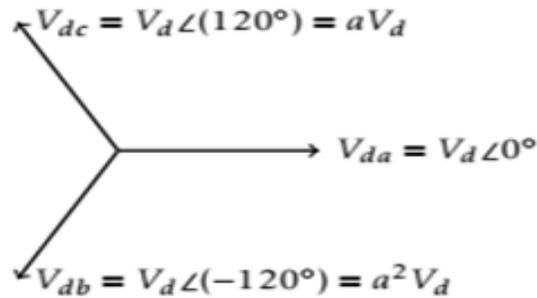


Fig. III.3 séquence direct

##### b. Système inverse:

Le système inverse est un système triphasé équilibré de séquence inverse (abc), comme Fig.III.4. [GAB]

système inverse :  
$$\begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ a V_d \\ a^2 V_d \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

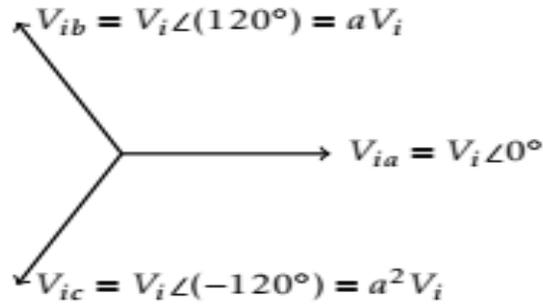


Fig.III.4 : séquence inverse

**c . Système homopolaire :**

Le système **homopolaire** est un système triphasé équilibré où les tensions sont égales, comme à la Fig.III.5.[GAB]

système inverse :  $\longrightarrow \begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot V_o \quad (III.3)$

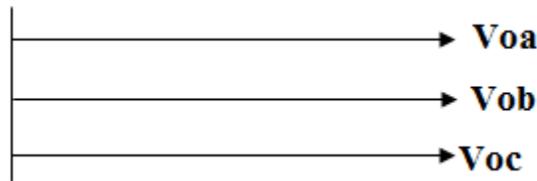


Fig.III.5 : séquence homopolaire .

On combine alors les trois systèmes (direct, inverse, homopolaire) pour obtenir un système complet :

Soit :  $\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$  un système triphasé déséquilibré  $\longrightarrow \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot V_d + \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \cdot V_i + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot V_o \quad (III.4)$

**Représentation matricielle :**

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}}^M \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{bmatrix} \quad (III.5) \quad \longrightarrow \quad \begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

Avec :  $M^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

Soit un système triphasé déséquilibré avec des impédances :  $\begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix}$ . [GAB]

$$\text{On peut écrire : } \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} Z_d \\ Z_i \\ Z_o \end{bmatrix} ; \begin{bmatrix} Z_d \\ Z_i \\ Z_o \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$$Z_d = 1/3(1 + a + a^2)Z = 0.$$

$$Z_i = 1/3(1 + a^2 + a)Z = 0. \quad (\text{III.9})$$

$$Z_o = 1/3(1 + 1 + 1)Z = Z.$$

On vérifie aisément que si le système initial est équilibré, on obtient :

$$V_d = V_a \text{ et } V_i = V_h = 0.$$

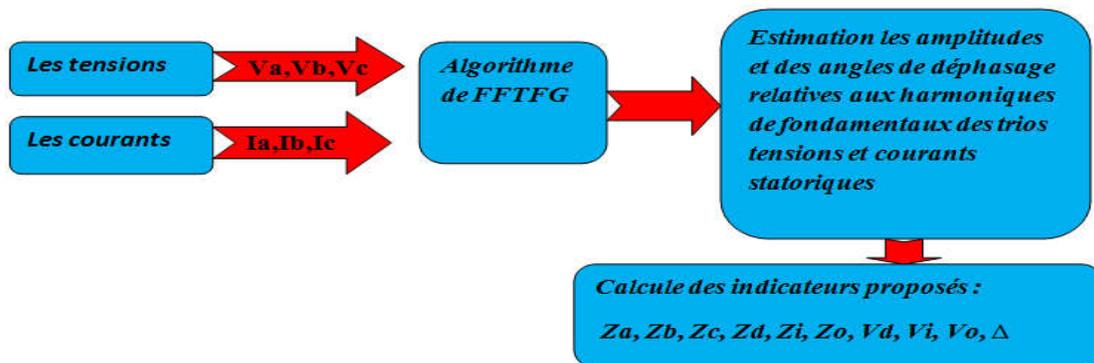
En effet, l'amplitude de la composante  $V_i$  ne prend une valeur non nulle que si le système est déséquilibré. Cette grandeur, rapportée à l'amplitude de la composante directe ( $V_d$ ) peut donc servir de mesure de déséquilibre de tension:

$$\Delta = \frac{\text{abs}(V_i)}{\text{abs}(V_d)}. \quad (\text{III.8})$$

Il est important de noter qu'un indicateur fiable est celui qui est sensible seulement à la présence du défaut concerné. Cependant et dans notre cas, il n'existe pas un seul indicateur fiable uniquement à la présence de défaut de court-circuit. En fait, tous les indicateurs définis dans la littérature sont sensibles non seulement au défaut de court-circuit mais aussi aux autres problèmes transitoires qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine. Pour cela, nous avons défini un ensemble des indicateurs de défaut de court-circuit entre spires. L'objectif est d'arriver à une détection sûr de ce type de défaut sans avoir de fausses alarmes à cause des problèmes transitoires tels que le déséquilibre de tension ou les variation de la charge.

Le calcul des composantes symétriques des tensions et des impédances, effectué précédemment, nous a permet de définir de un ensemble des indicateurs de défaut de court-circuit entre spires. Ces indicateurs sont les suivants :

- **Les trois impédances statoriques :  $Z_a, Z_b, Z_c$ .**
- **Les trois composantes symétriques des impédances statoriques :  $Z_d, Z_i, Z_o$ .**
- **L'indice de déséquilibre de tensions d'alimentation :  $\Delta$ .**



**Fig. III.6 :** Schéma représentatif de la méthode proposée pour la détection de défaut de court-circuit entre spires statoriques.

### III.5. Etude expérimentale :

Le banc d'essai utilisé pour cette étude expérimentale est disponible au niveau du laboratoire LMSE de l'université de Biskra. Il contient une source de tension triphasé, un moteur asynchrone triphasé à cage de puissance 3kw. Ce moteur a été rebobinée spécialement pour introduire un défaut de court-circuit entre 3 ou 6 spires dans chaque phase. Une génératrice à courant continu entraînée par le moteur asynchrone et qui débite sur une charge résistive, les deux jouent le rôle d'une charge mécanique pour le moteur. Le banc d'essai contient aussi trois capteurs de tension et trois de courant et une carte d'acquisition qui fonctionne sur l'environnement LabVIEW. Une rhéostat branchée sur une phase statorique est utilisée pour introduire un problème de déséquilibre de tension.

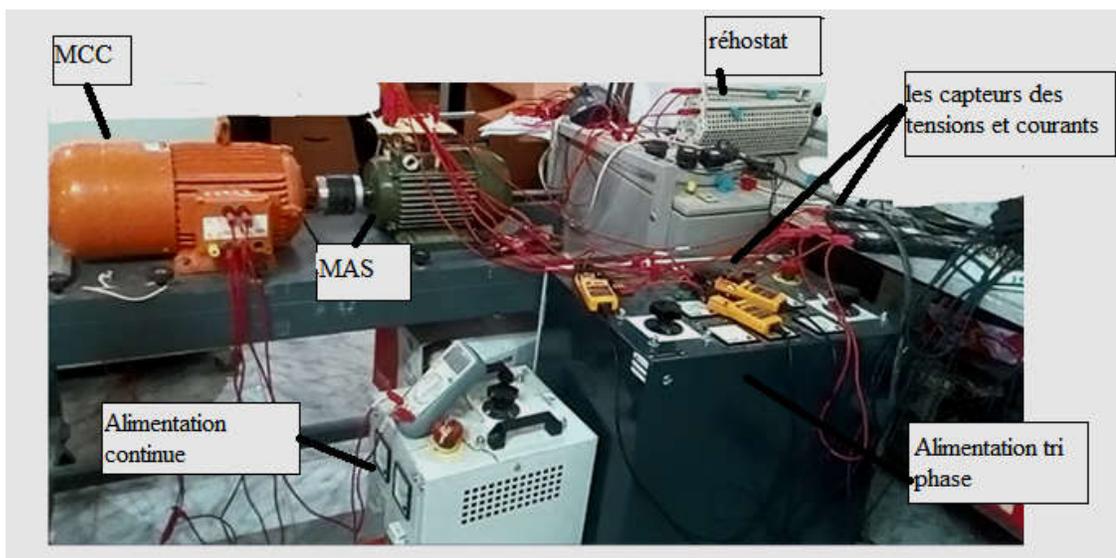


Fig. III.7 : Le banc d'essai



Fig. III.8 : capteur de courant



Fig. III.9 : capteur de courant



Fig. III.10: Commutateur bidirectionnel permettant la commutation entre l'état sain et déséquilibrée



Fig. III.11: carte d'acquisition

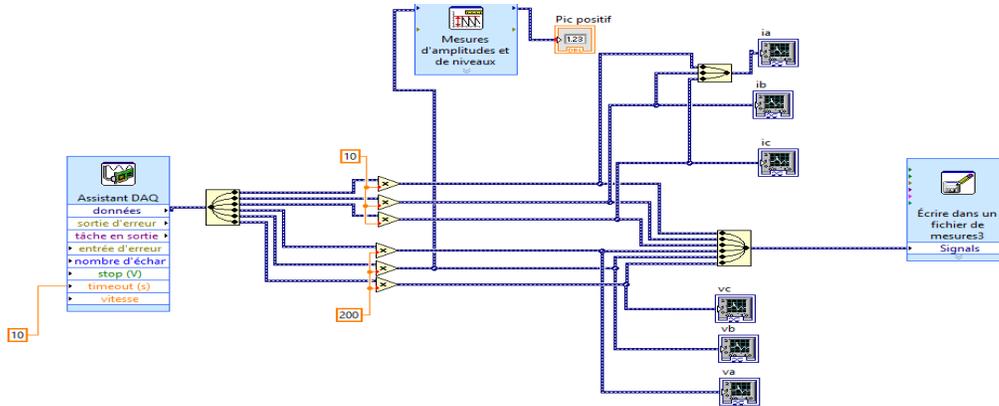


Fig. III.12 : Procédure d'acquisition, visualisation et enregistrement des signaux en utilisant LabVIEW.

Afin de suivre online l'évolution des différents indicateurs ainsi définis, l'algorithme de calcul proposé a été implémenté sous l'environnement LabVIEW. Le calcul des indicateurs proposés nécessite l'acquisition des trois tensions et courants statoriques. Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- La fréquence d'échantillonnage :  $f_e = 10000$  Hz.
- Taille de la fenêtre  $N = 10000$  échantillons qui correspond à 1 s.
- La résolution fréquentielle de FFTFG :  $df = \frac{1}{1} = 1$  Hz.

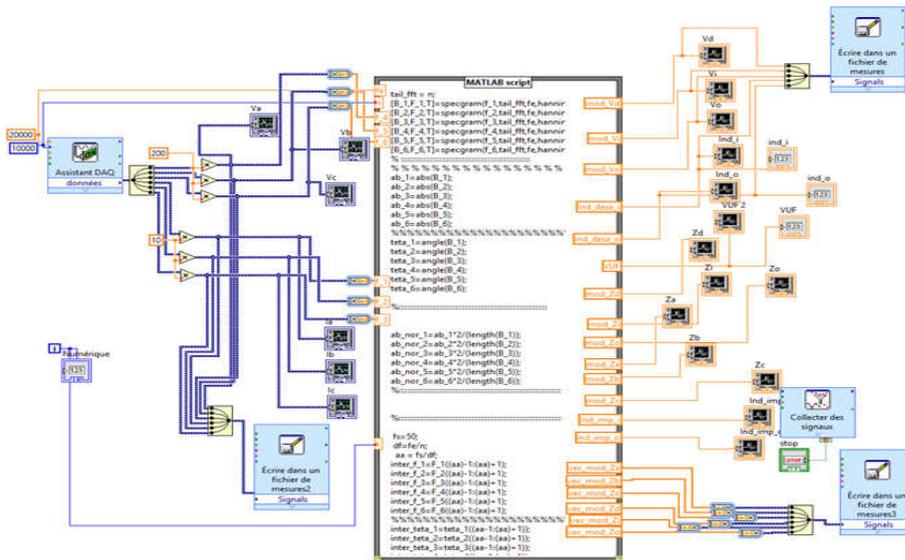
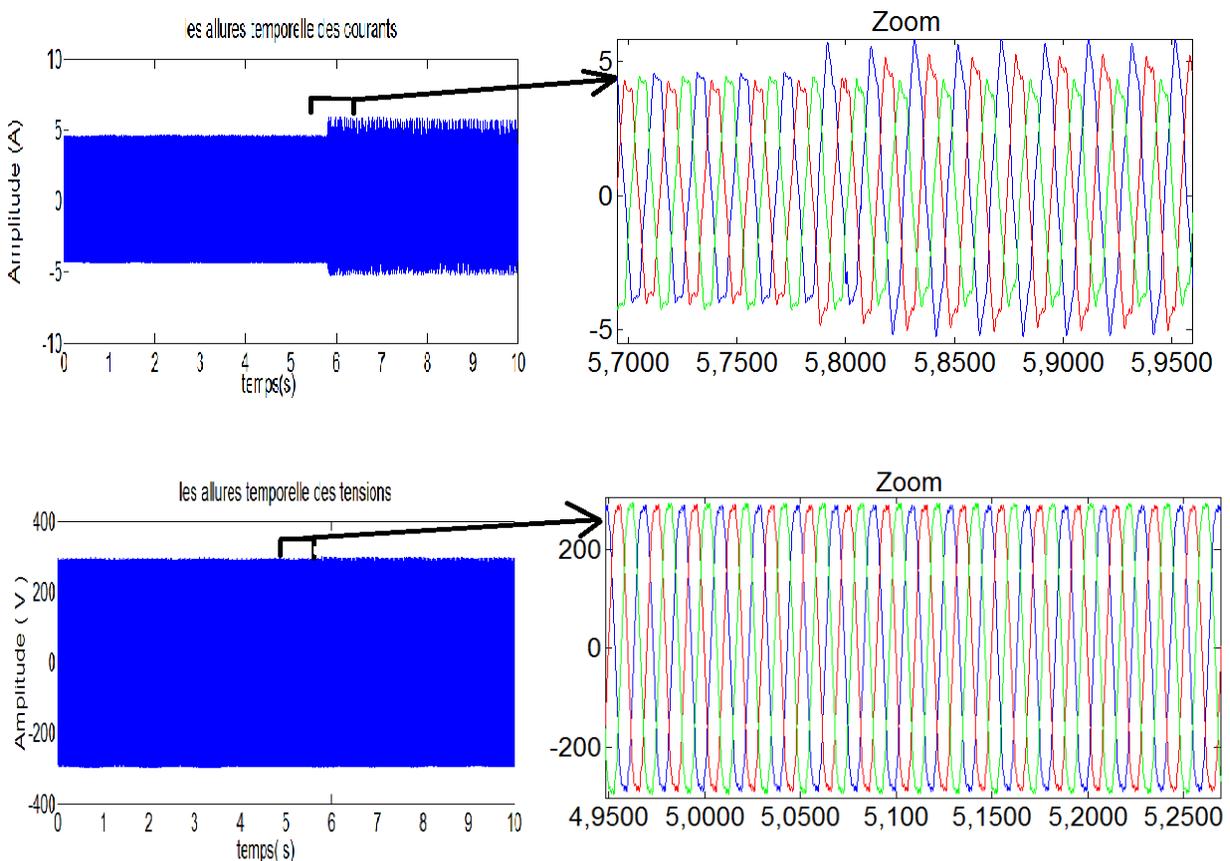


Fig. III.13 schéma représentant l'implantation online de la méthode proposée

### III.6. Impact du défaut de court-circuit sur les indicateurs définis

Dans le but d'étudier l'influence de défaut de court-circuit entre spires (CCSP) sur les différents indicateurs proposés. Le moteur a été démarré à l'état sain pendant presque 5 s puis, on a introduit brusquement un défaut de 6 spires en court-circuit dans la phase « a ». Durant ce fonctionnement, le système d'acquisition enregistre d'une manière continue les courants et les tensions statoriques qui servent à calculer l'ensemble des indicateurs définis précédemment.

La figure (III.14) montrent que la présence de défaut CCSP provoque une augmentation sur les allures temporelles des courants statoriques et surtout le courant de la phase en défaut. Par contre, les tensions statoriques sont moins influées par ce défaut. On remarque que la variation de ces grandeurs ne peut être considérée comme une indication de la présence de ce type de défaut.



**Fig. III.14** les allures temporelles des courants et tensions statoriques à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.

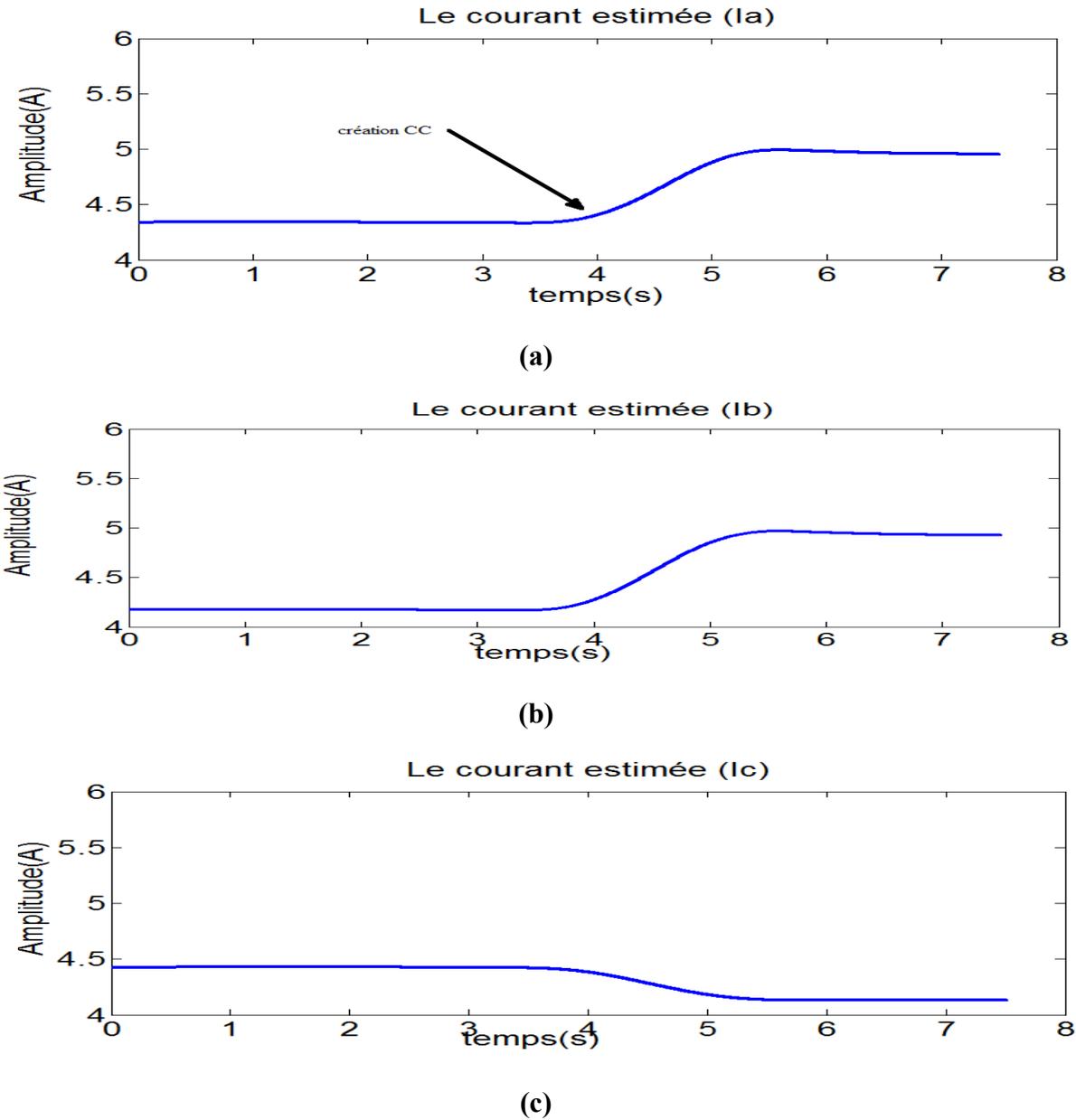
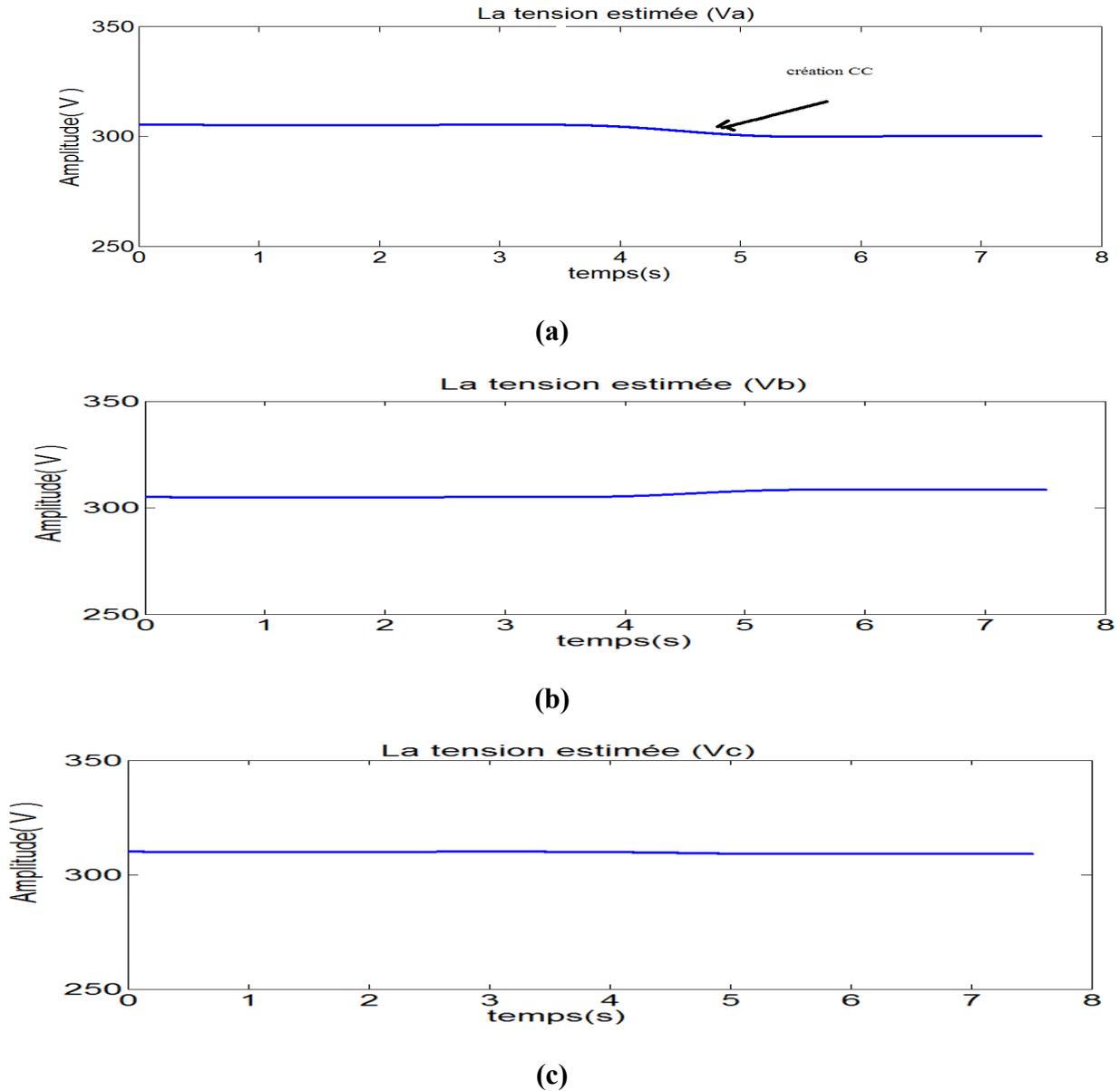


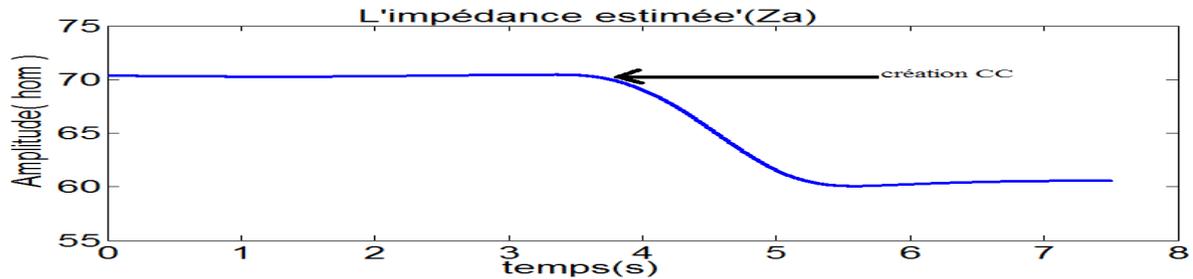
Fig. III.15 : les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois courants statoriques à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.



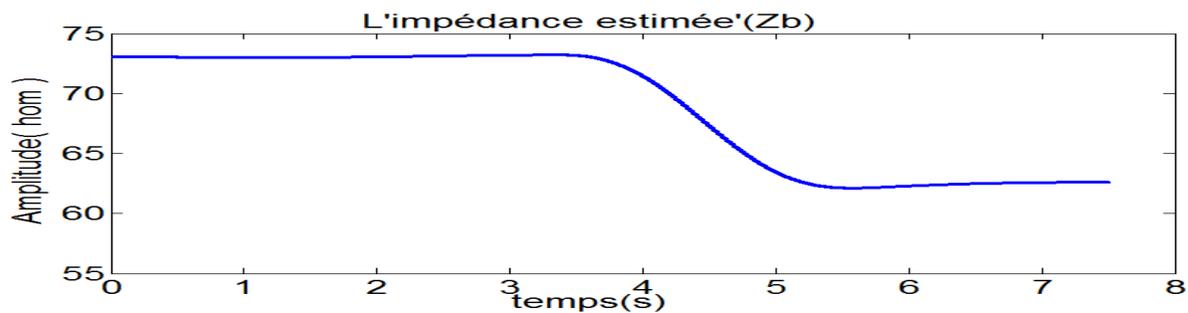
**Fig. III.16 :** les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois tensions statoriques à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.

Selon les figures (III.15-16), les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux correspondants aux courants et tensions, restent presque constantes pendant tout l'état sain jusqu'à l'instant où on a introduit le défaut de CCSP dans la phase (a). Nous avons remarquées que les courants dans la phase en défaut « a » et celle qui la suit « b » subissent des augmentations 25% (Fig. III.15.a et III.15.b) ; par contre, le courant dans la phase « c » a

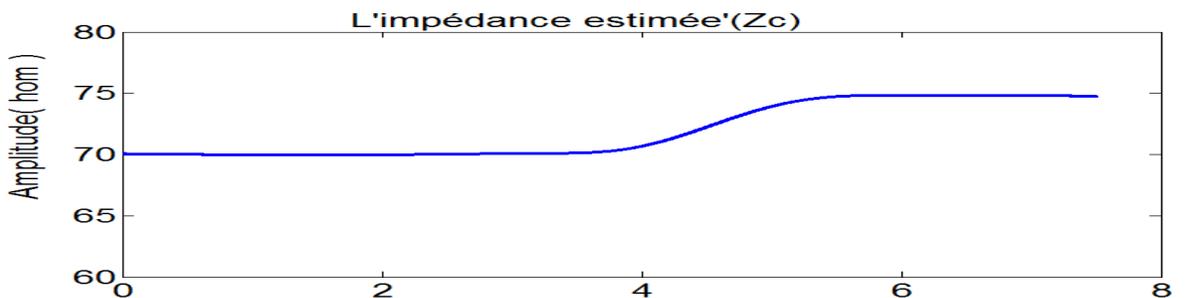
sensiblement diminué. Ceci est dû au couplage magnétique des trois phases statoriques. Concernant les tensions statoriques, il est clair que les amplitudes des harmoniques fondamentaux restent quasi-constantes même à la présence du défaut (Fig. III.16).



(a)



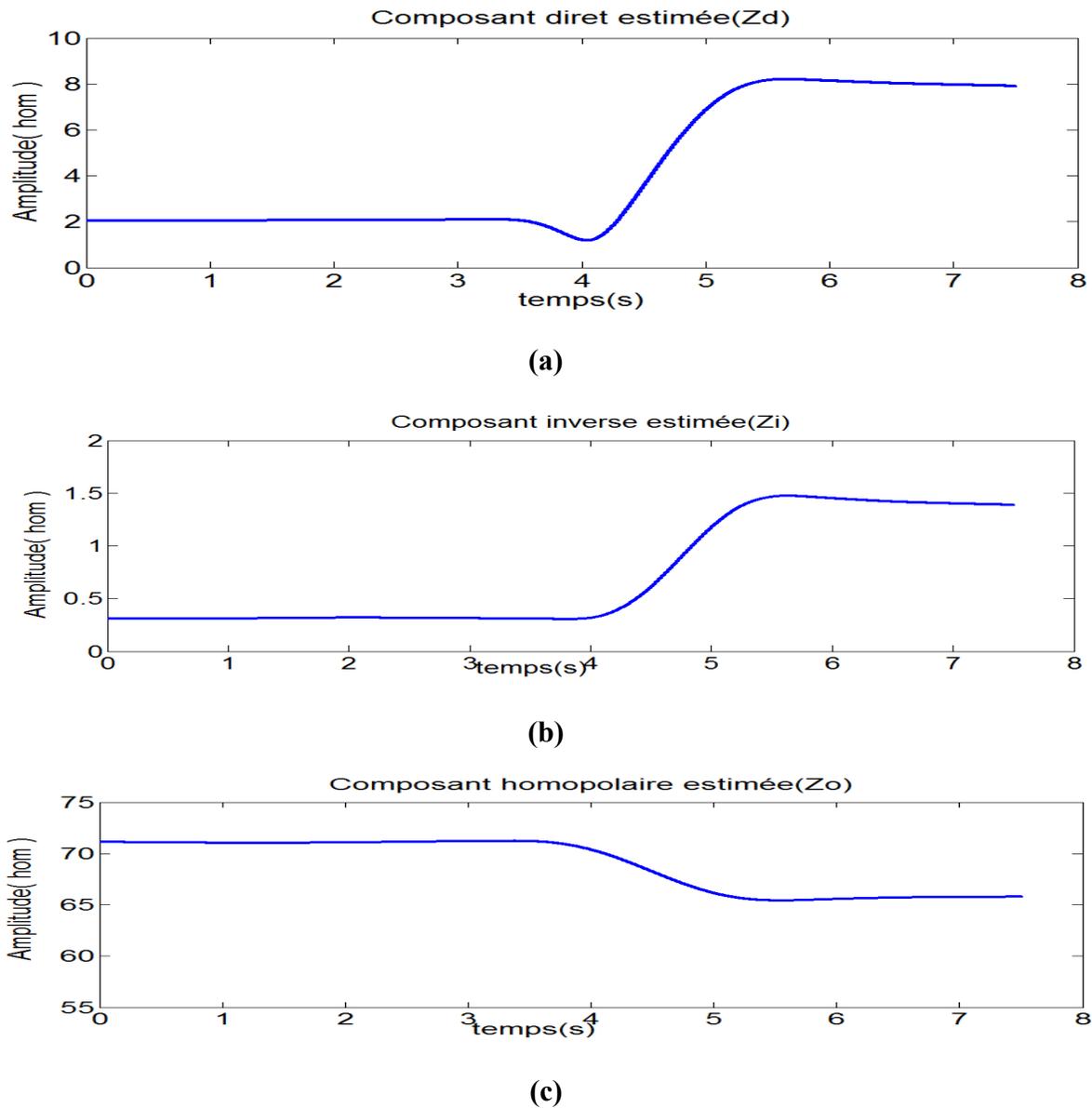
(b)



(c)

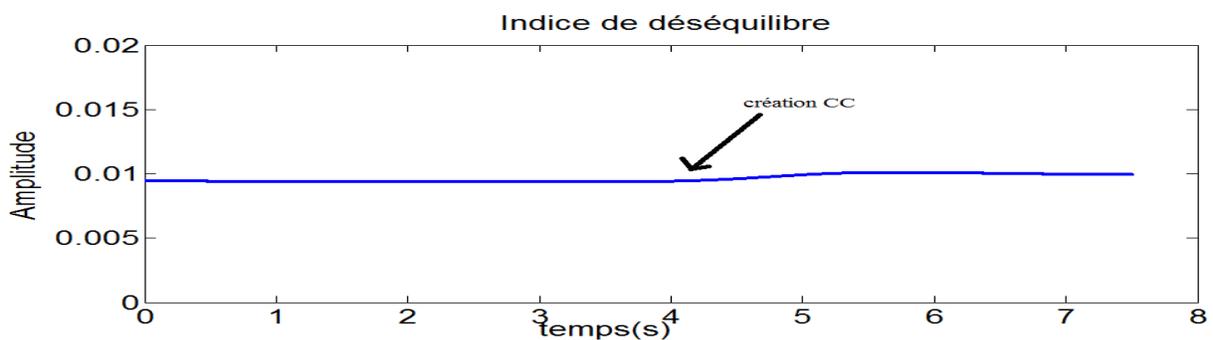
Fig. III.17 : les amplitudes des impédances statoriques estimées à l'état sain avec 6 spires en court-circuit

Passant maintenant aux allures des impédances statoriques calculées à partir des harmoniques fondamentaux des tensions et des courants statoriques. La figure (III.17) montre que les amplitudes de ces impédances ont presque les mêmes valeurs à l'état sain mais, après l'introduction du défaut CCSP (au alentour de 5 s), on a remarqué que les impédances des phases « a » et « b » sont considérablement diminuées (Fig. III.17.a et III.17.b) ; par contre, l'impédance de la phase « c » a augmentée significativement (Fig. III.17.c). Ces variations sont très logiques, puisqu'elles sont dans le sens inverse des variations observées sur les courants.



**Fig. III.18** : les amplitudes estimées des composantes symétriques correspondantes aux impédances statoriques à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.

La figure (III.18) montre l'évolution des amplitudes des composantes symétriques  $Z_d$ ,  $Z_i$  et  $Z_o$ . On remarque qu'à l'état sain, les composantes  $Z_d$  et  $Z_i$  ont de petites valeurs (non nulles), ceci est dû à la présence d'un certain degré de déséquilibre naturel dans les enroulements statoriques. Par contre, la composante  $Z_o$  est égale à la valeur moyenne des trois impédances  $Z_a$ ,  $Z_b$  et  $Z_c$  ; ceci est en concordance avec la théorie. Après l'introduction du défaut de CCSP, on a observé des augmentations significatives au niveau des composantes  $Z_d$  et  $Z_i$  (Fig. III.18.a-b). Au même temps, une diminution sur la composante  $Z_o$  est clairement observable (Fig. III.18.c).



**Fig. III.19** : l'évolution de l'indice de déséquilibre estimé à l'état sain puis avec 6 spires en court-circuit.

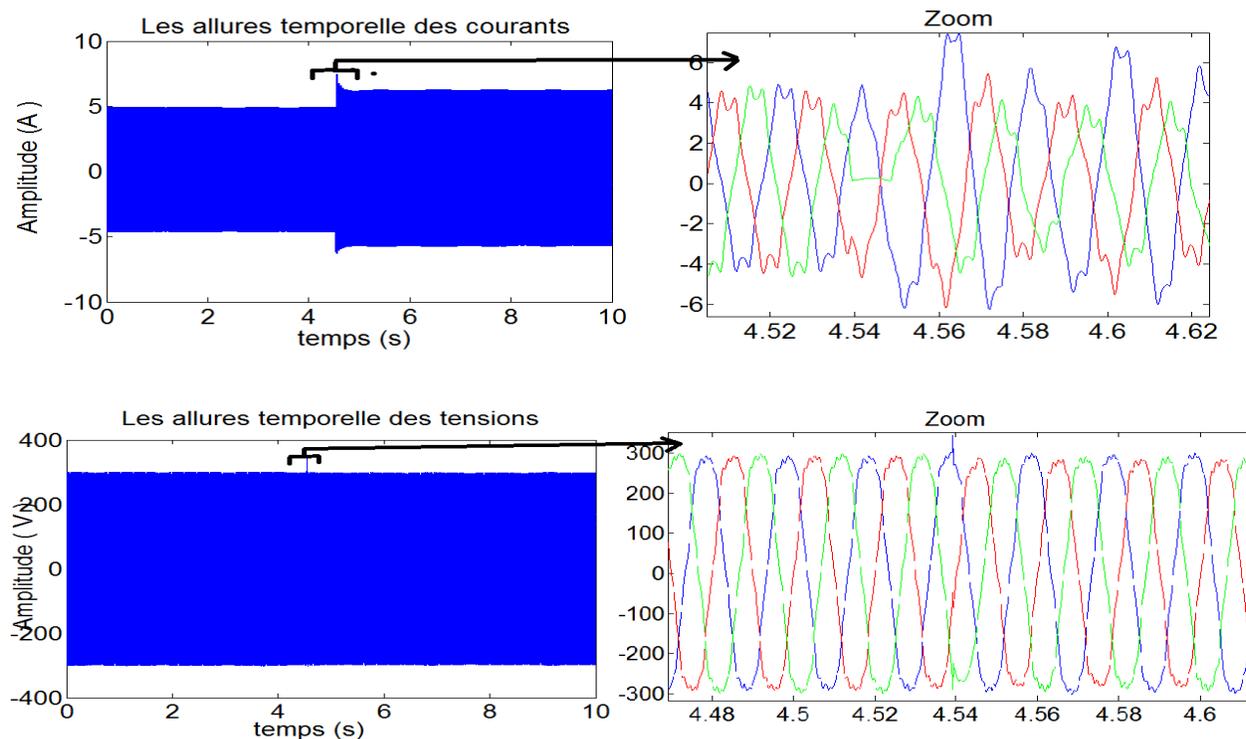
Concernant l'indice de déséquilibre ( $\Delta$ ), la figure III.19 illustre clairement qu'il est presque insensible à la présence de défaut de CCSP. En effet, les valeurs de cet indice restent très petites ce qui confirme que les tensions d'alimentation sont quasi-équilibrées, c'est-à-dire qu'il existe un certain déséquilibre de tension acceptable.

### III.7. Test de fiabilité des indicateurs proposés

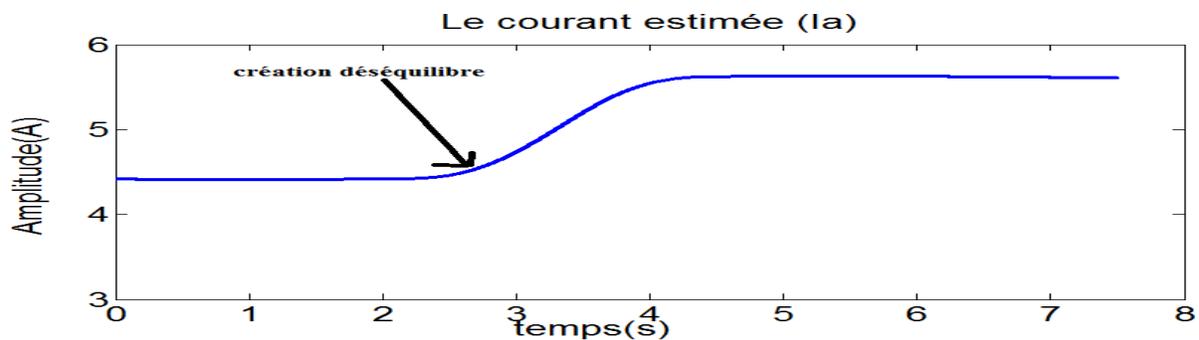
Dans les paragraphes précédentes, on a étudié l'influence de la présence d'un défaut de court-circuit entre spires sur les différents indicateurs ainsi proposés. Les essais expérimentaux effectués au niveau du laboratoire ont prouvés la possibilité de détecter facilement ce type de défaut. Cependant, on sait que certains problèmes tels que le déséquilibre des tensions d'alimentation et les variations brusques de la charge influent aussi sur ces indicateurs proposés. Donc, il est très important d'étudier les impacts de ces problèmes sur ces indicateurs et de trouver une solution pour distinguer entre un défaut réel de CCSP et un problème transitoire.

#### III.7.1. L'effet de déséquilibre sur les indicateurs :

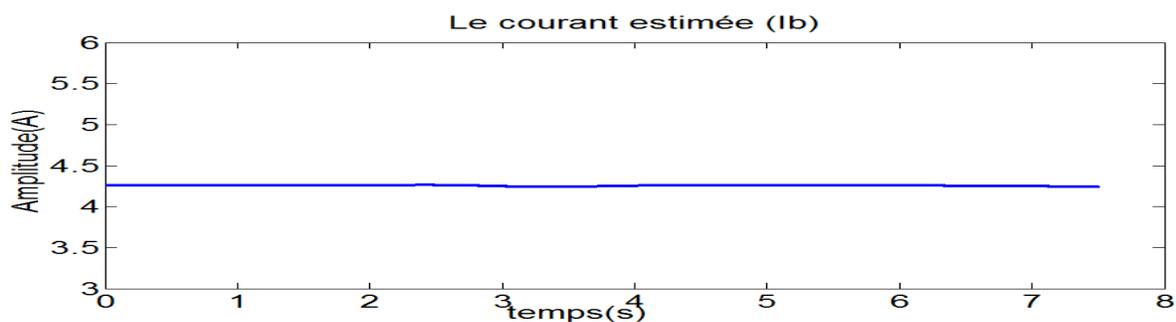
Dans cette partie, on a démarré le moteur à vide et à l'état sain puis, au alentour de l'instant  $t = 5$  s, on a émulé un déséquilibre de tension de 3.5% à l'aide d'un rhéostat monté en amont de la source .



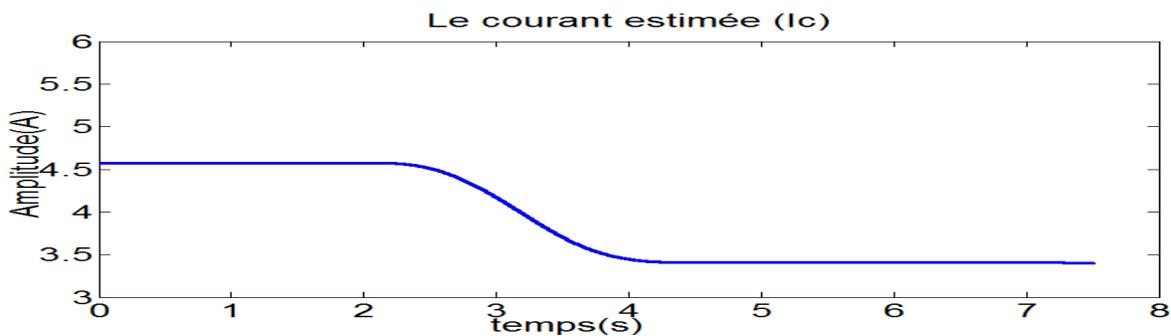
**Fig. III.20** les allures temporelles des courants et tensions statoriques à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.



(a)

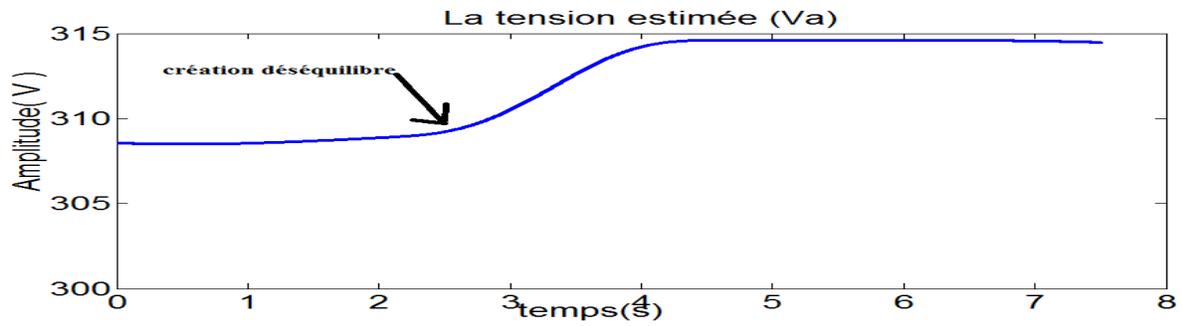


(b)

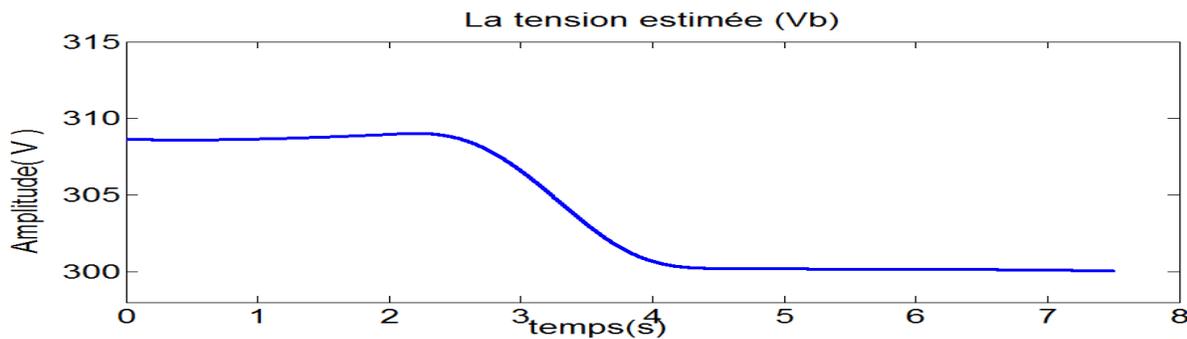


(c)

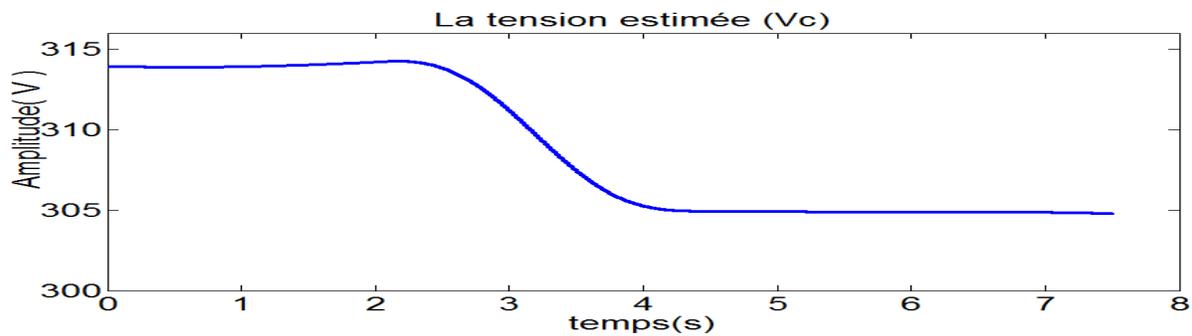
Fig. III.21 les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois courants statoriques à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.



(a)



(b)

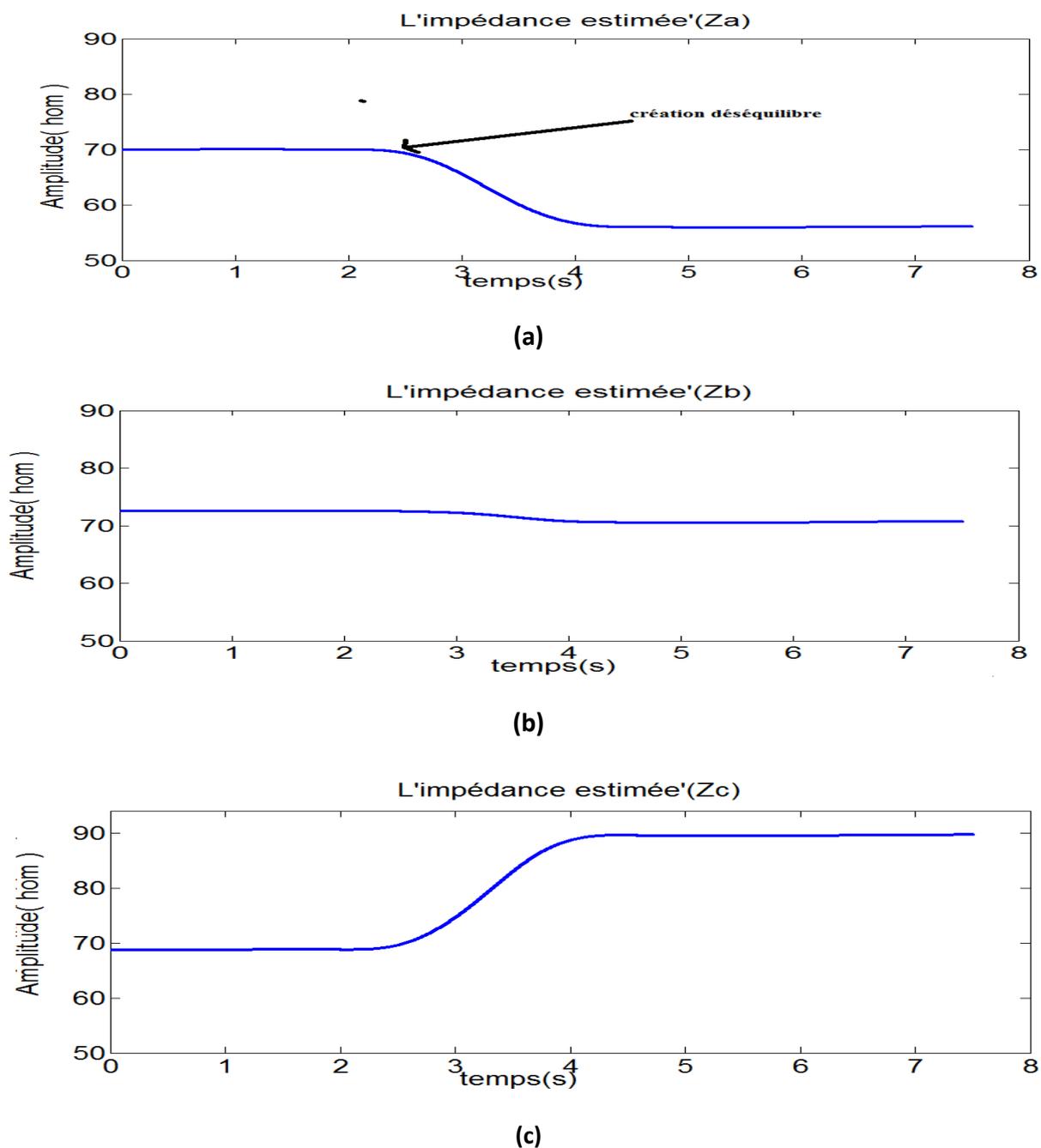


(c)

**Fig. III.22** les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois tensions statoriques à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %

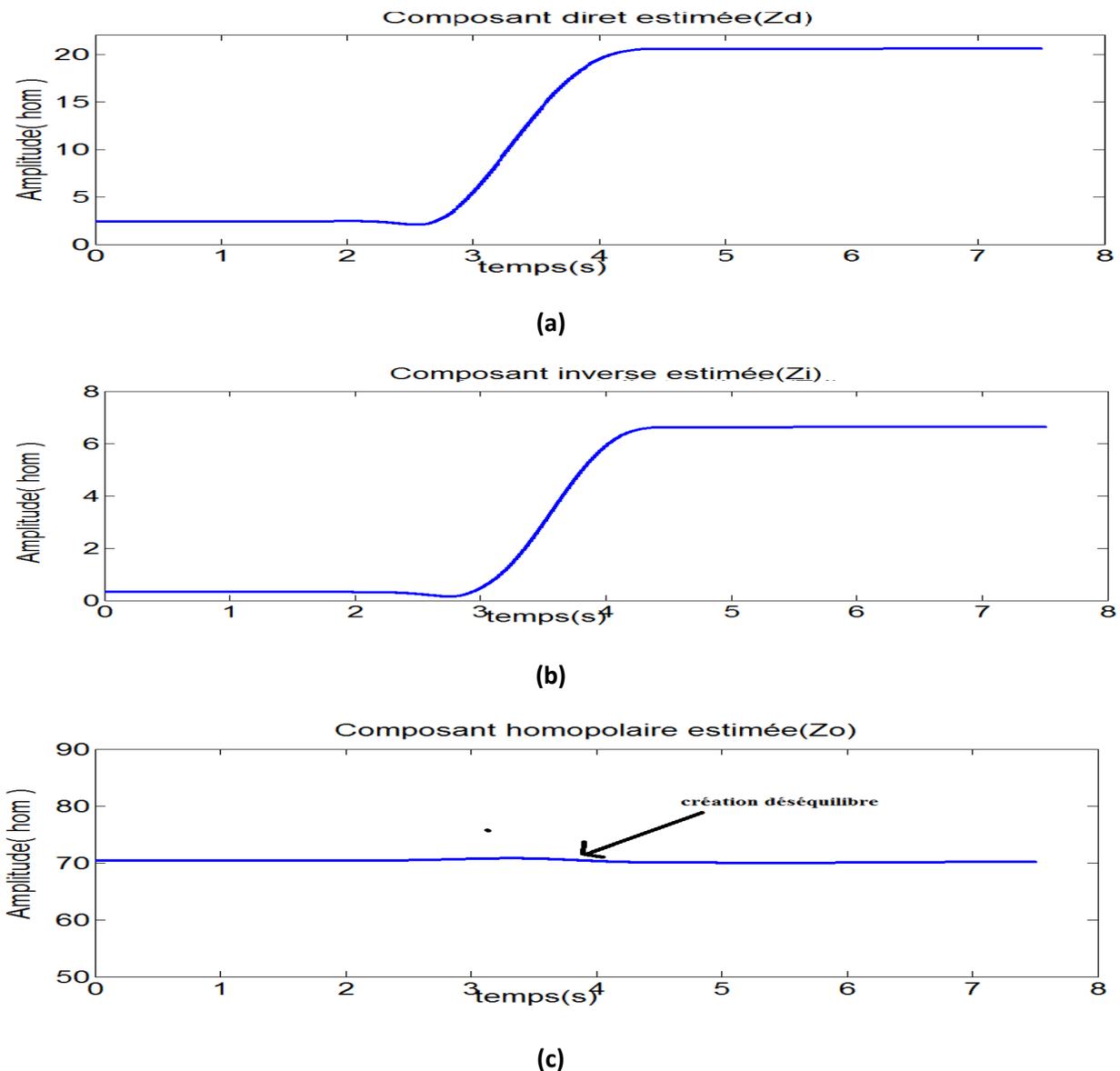
La figure (III.20) montrent que la présence d'un problème de déséquilibre de tension d'alimentation provoque des modifications sur les allures temporelles des courants et des tensions statoriques. Ceci est confirmé par les figures III.21 et III.22. On remarque que ces

variations ressemblent fortement aux celles dues à un défaut de CCSP. *Par conséquent, on ne peut pas les utiliser pour différencier entre le défaut de CCSP et le déséquilibre.*



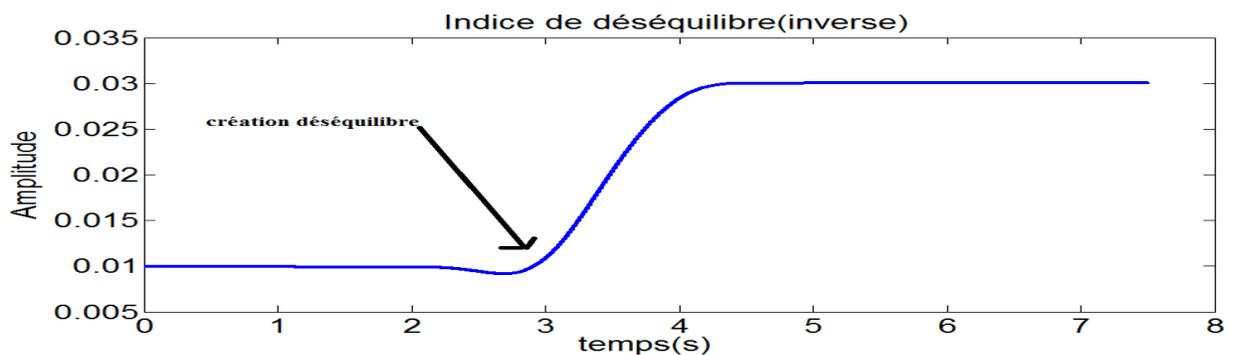
**Fig. III.23** : les amplitudes des impédances statoriques estimées à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %

Selon la figure III.23, on remarque que l'influence de déséquilibre sur les impédances statoriques, calculées à partir des amplitudes fondamentales des trois tensions et courants statoriques, ressemble aussi aux influences causées par le défaut CCSP. Par conséquent et à travers les allures des ces impédances, on ne peut pas confirmer qu'il s'agit d'un défaut de CCSP ou d'un problème de déséquilibre.



**Fig. III.24:** les amplitudes estimées des composantes symétriques correspondantes aux impédances statoriques à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %

Selon la figure III.24.a et III.24.b, on remarque que le déséquilibre de 3% provoque une augmentation sur les composantes symétriques  $Z_d$  et  $Z_i$  comme le cas déjà observé lorsqu'on a introduit un défaut de CCSP. Mais, cette augmentation est très importante par rapport à celle créée par le court-circuit de 6 spires. Cependant et du point de vue qualitative, on ne peut pas différencier entre le déséquilibre de tension et le défaut de CCSP. D'autre part, la figure III.24.c montre une chose très importante ; **la composante homopolaire  $Z_o$  reste constante est insensible à la présence de déséquilibre de tension. Par contre, on a remarqué que le défaut de CCSP incite toujours une diminution sur la composante  $Z_o$ .** Ceci peut être considéré comme un facteur de séparation entre un défaut de CCSP et le déséquilibre de tension.



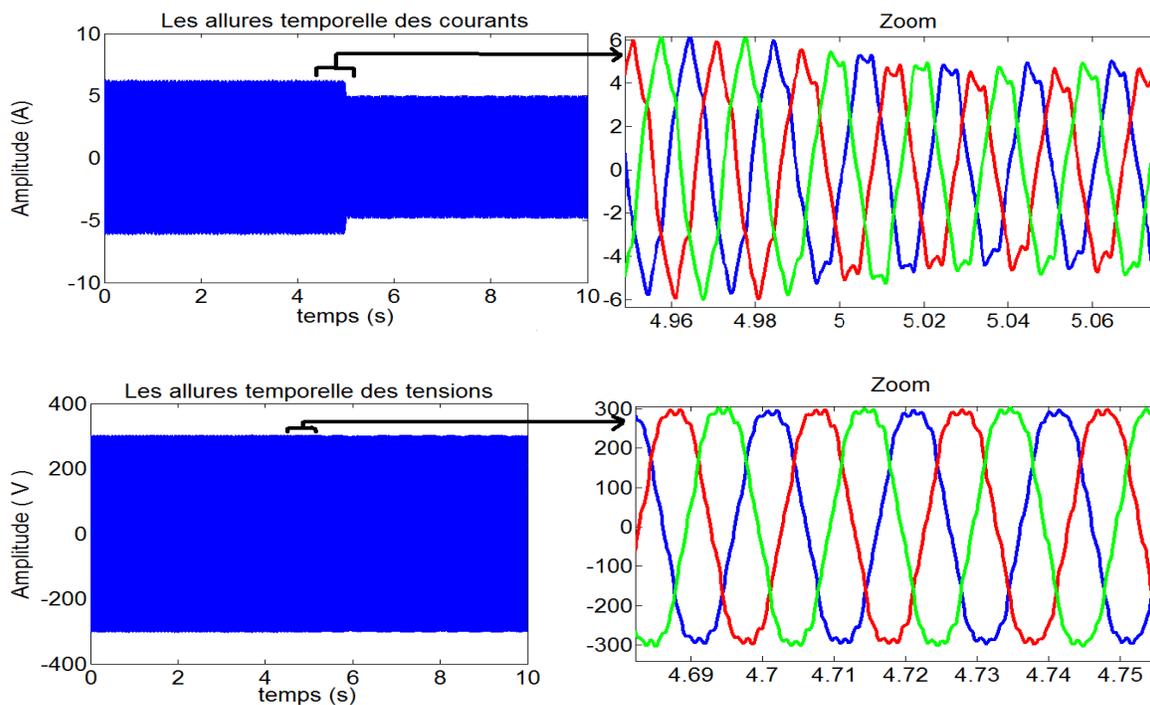
**Fig. III.25 :** l'évolution de l'indice de déséquilibre estimé à l'état sain puis avec déséquilibre de 3.5 %.

Passant à la figure III.25, on remarque que l'indice  $\Delta$  de déséquilibre augmente sensiblement suite à l'apparition d'un déséquilibre de 3% dans les tensions d'alimentation. Par contre, cet indice a resté constant et presque insensible au défaut de CCSP. **Cette observation est d'importance cruciale puisqu'elle signifie que l'indice  $\Delta$  ne dépend que de déséquilibre de tension.**

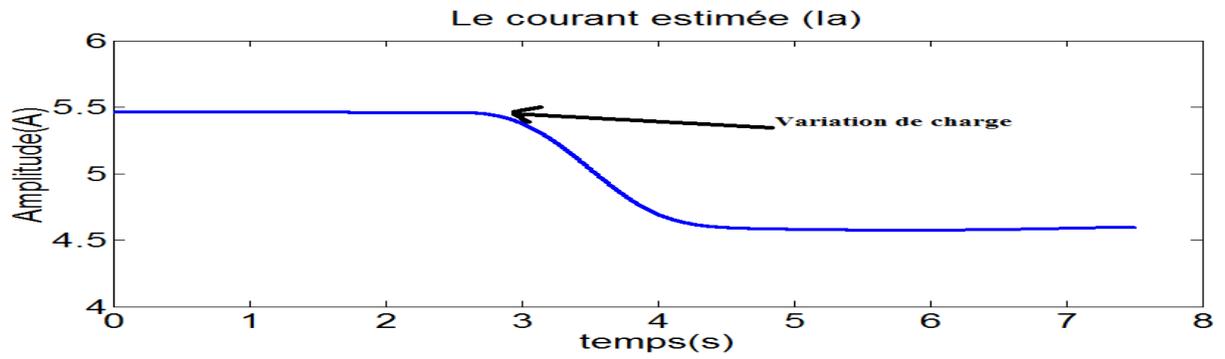
### III.7.2. L'effet de variation de la charge sur les indicateurs :

Comme nous l'avons dit précédemment, la variation au niveau de la charge mécanique influe aussi sur l'ensemble des indicateurs proposés. Pour cela, nous avons démarré la machine à 25% de la charge nominale et après presque 5 s, on a diminué brusquement la charge jusqu'à 0%. On a obtenu les résultats suivants :

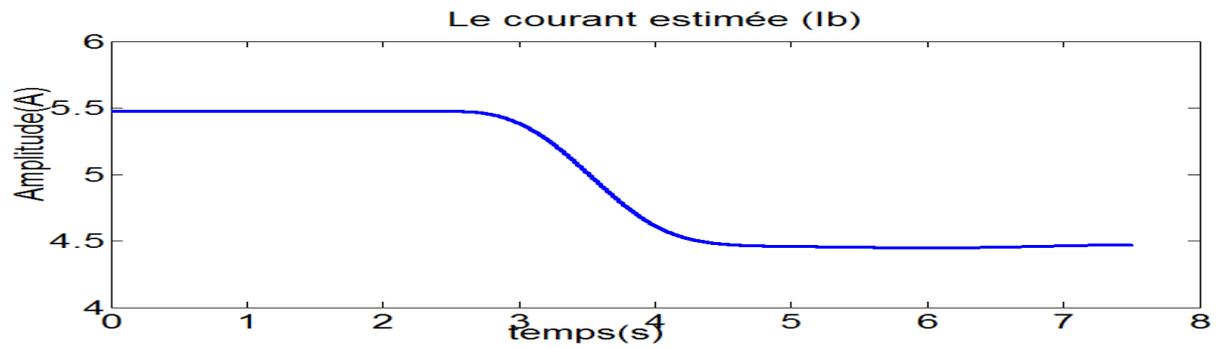
Les figures (III.26, III.27 et III.28) montrent que la diminution de la charge entraîne une réduction dans le même sens sur les amplitudes des trois courants statoriques. Cependant, les amplitudes des tensions d'alimentation restent presque constante est insensible à la variation de la charge.



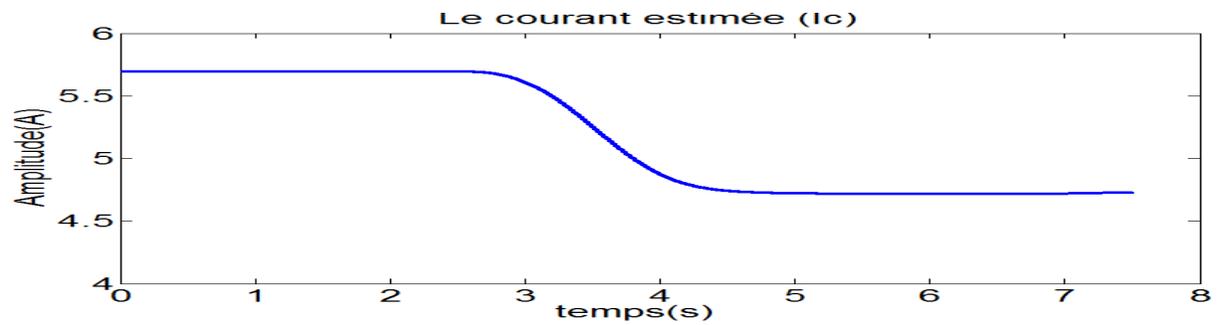
**Fig. III.26:** les allures temporelles des courants et tensions statoriques à l'état sain puis avec variation brusque de charge.



(a)

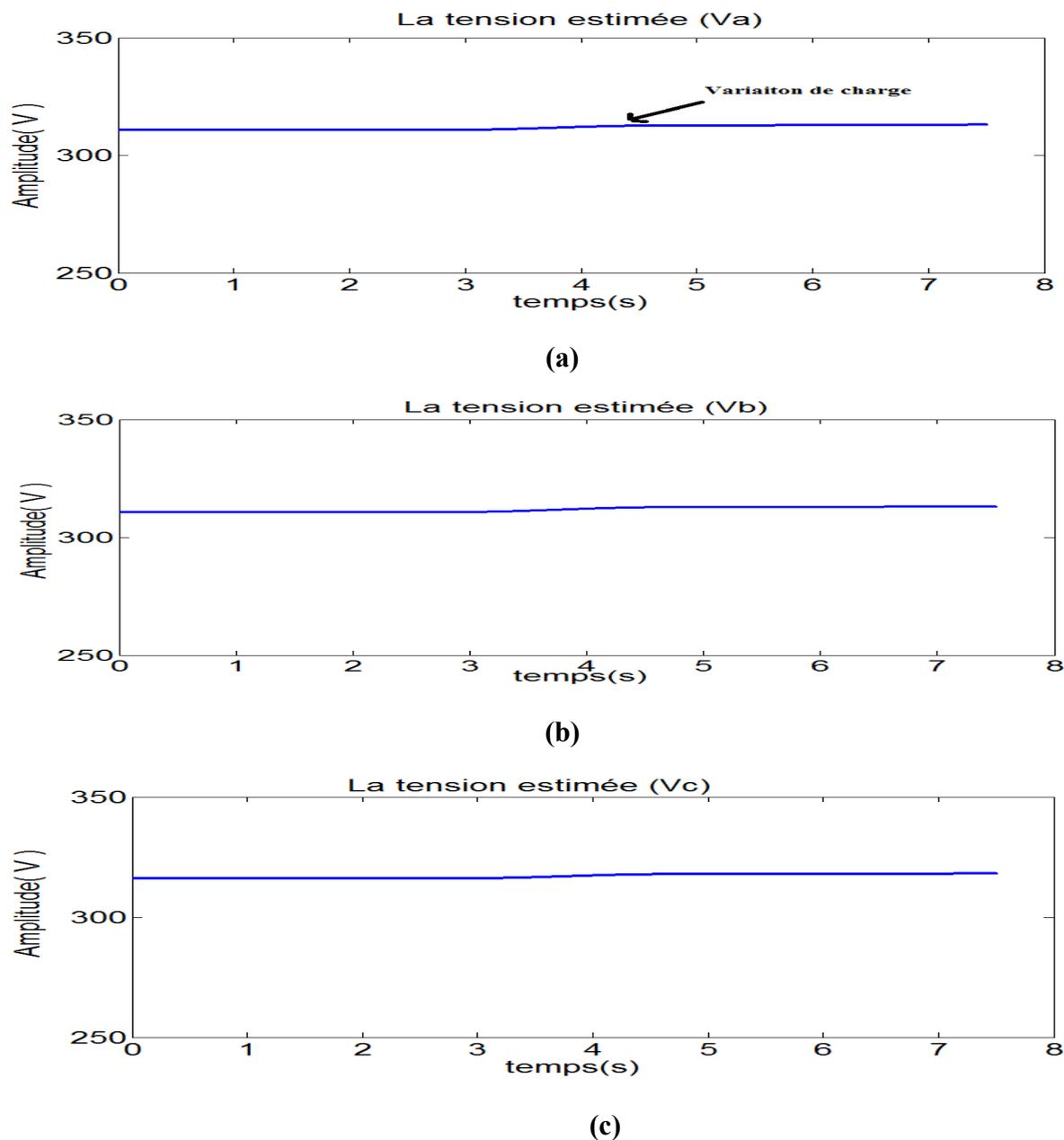


(b)

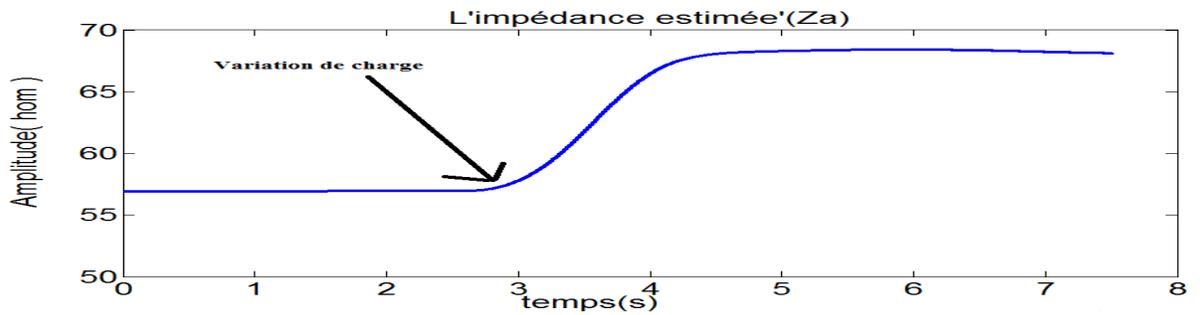


(a)

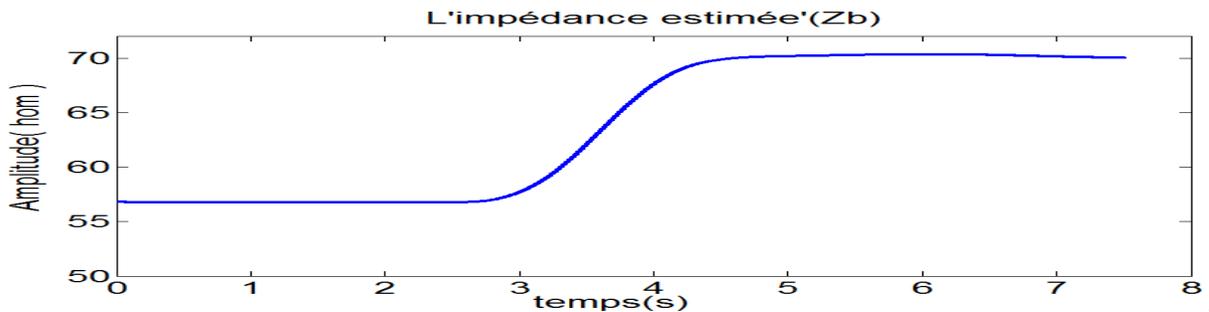
Fig. III.27 les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois courants statoriques à l'état sain puis avec variation brusque de charge.



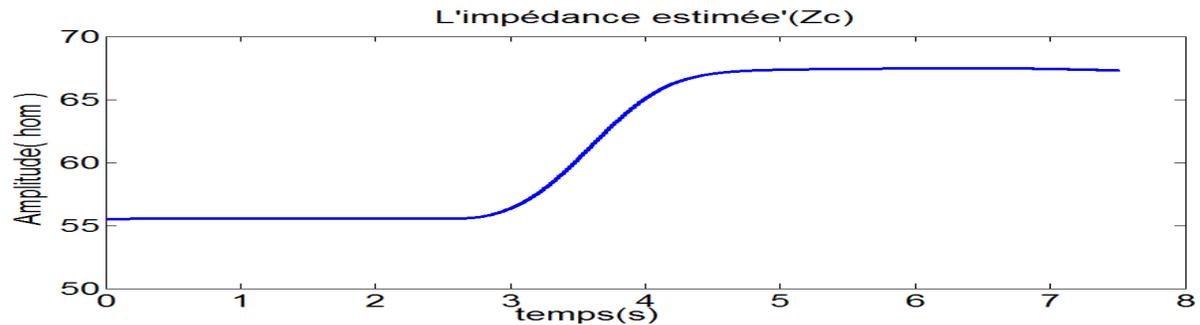
**Fig. III.28** les amplitudes estimées des harmoniques fondamentaux des trois tensions statoriques à l'état sain puis avec variation brusque de charge.



(a)



(b)

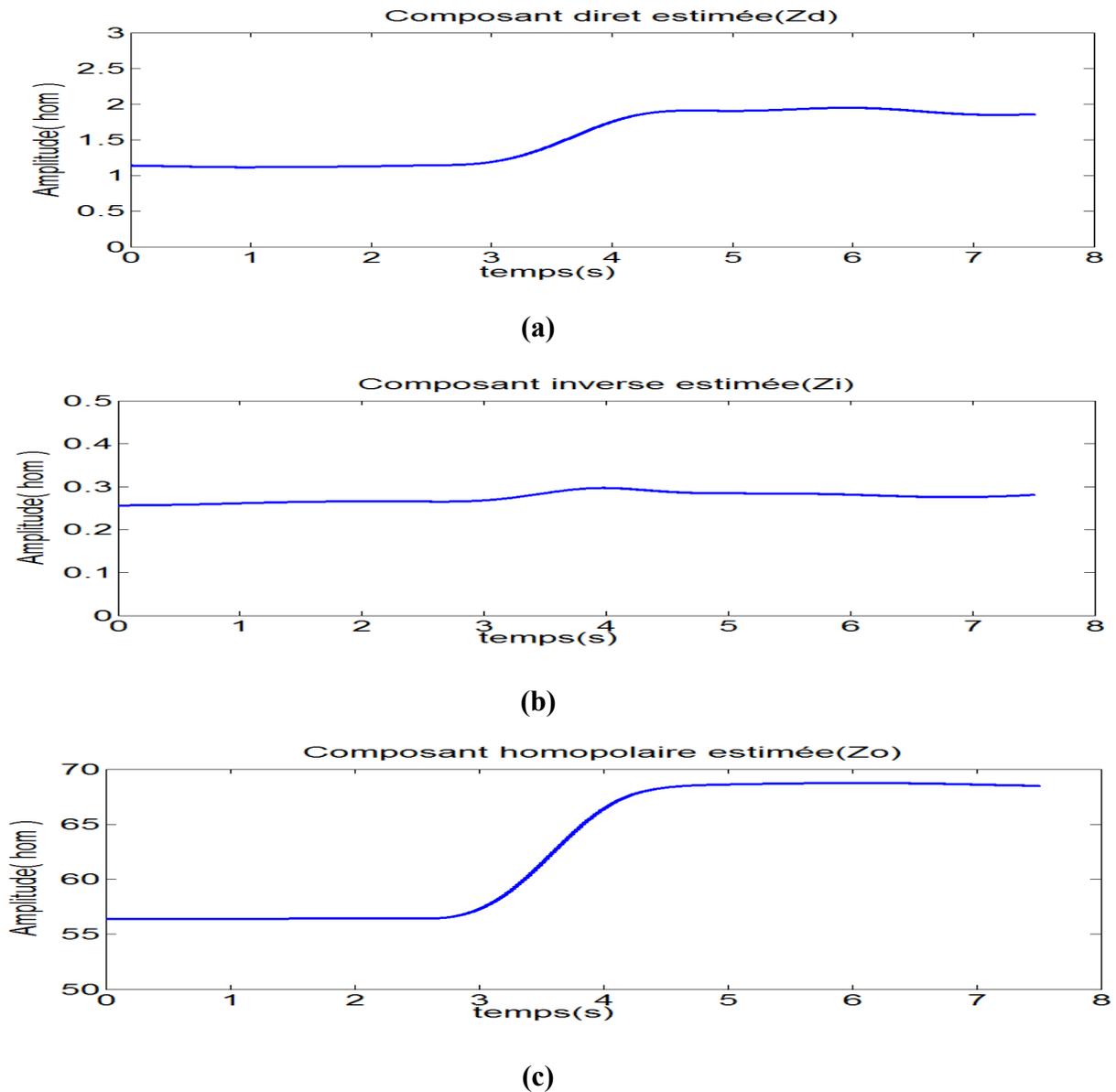


(c)

**Fig.III.29** : les amplitudes des impédances statoriques estimées à l'état sain puis avec variation brusque de charge.

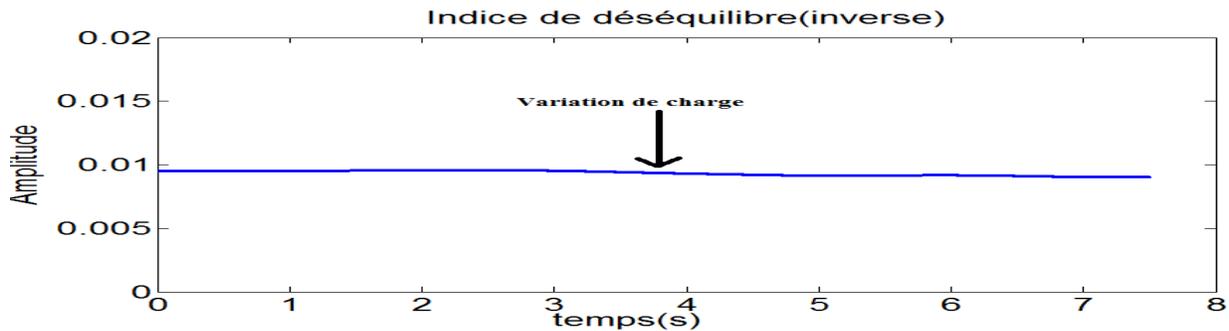
La Figure III.29, montre que les impédances ( $Z_a$ ,  $Z_b$  et  $Z_c$ ), calculées à partir des amplitudes fondamentales des tensions et courants statoriques, accroissent les trois dans le même sens suit à une diminution de la charge. Automatiquement, dans le cas où il y a une augmentation dans la charge, ces impédances se réduisent les trois dans le même sens. On constate que la variation simultanée des impédances statoriques dans le même sens signifie qu'il s'agit d'un

changement dans la charge entraînée. Cette influence de la charge sur les impédances est très différentes par rapport aux influences de CCSP et le déséquilibre de tension. *Ceci peut être considéré comme un facteur de distinction entre un défaut de CCSP ou déséquilibre et une variation dans la charge.*



**Fig. III.30:** les amplitudes estimées des composantes symétriques correspondantes aux impédances statoriques à l'état sain puis avec variation de charge.

Les figures III.30.a et III.30.b illustrent que la diminution brusque de la charge influe légèrement sur les composantes symétriques  $Z_d$  et  $Z_i$ , par contre, la figure III.30.c montre que l'allure de  $Z_o$  suit le sens de variation des impédances statoriques ( $Z_a$ ,  $Z_b$  et  $Z_c$ ).



**Fig.III.31** : l'évolution de l'indice de déséquilibre estimé à l'état sain puis avec variation de charge.

La figures III.31 montre clairement que l'indice de déséquilibre est insensible à la variation de la charge. En effet, il prend toujours de petites valeurs qui indique l'absence de déséquilibre de tension.

### III.7.3. Interprétation générale des résultats

*A la lumière de cette étude, on peut confirmer les constats suivants :*

- *L'indice de déséquilibre  $\Delta$  est sensible seulement à la présence de déséquilibre de tensions d'alimentation. Il est insensible à la présence d'un défaut de CCSP ou les variations dans la charge. A l'état sain, il prend des très petites valeurs et juste après le déséquilibre, il augmente considérablement. Cependant, la présence d'un déséquilibre de tension augmente les composantes symétriques  $Z_d$  et  $Z_i$  mais, il n'influe pas sur la composante homopolaire  $Z_o$ .*
- *La présence d'un défaut de CCSP entraîne des accroissements sur les composantes symétriques  $Z_d$  et  $Z_i$  (comme le cas de déséquilibre de tension) mais, il provoque une diminution sur la composante  $Z_o$ . Cet effet est le seul facteur qui permet de différencier entre un défaut de CCSP et un déséquilibre de tension.*

- *La variation de la charge n'a aucun effet sur l'indice de déséquilibre ( $\Delta$ ). Cependant, elle influe sur  $Z_d$ ,  $Z_i$  et  $Z_o$  ce qui peut altérer la détection de défaut CCSP. Donc, pour éviter une fausse alarme, on doit observer les impédances statoriques  $Z_a$ ,  $Z_b$  et  $Z_c$ . En effet, si elles varient les trois dans le même sens, on peut confirmer qu'il s'agit d'une variation de la charge et n'on pas un défaut de CCSP.*

### **III.8. Validité de la méthode proposée pour une séquence des événements :**

Dans cette partie, on va étudier et tester la validité de la méthode proposée dans le cas d'une séquence de plusieurs évènements lors du fonctionnement du moteur. Pour cela, notre moteur a été d'abord démarré puis, on a effectué plusieurs évènements selon la séquence suivante :

- 1. Démarrage à vide à l'état sain ;*
- 2. Application d'une charge de 30% à l'état sain ;*
- 3. Elimination de la charge et toujours à l'état sain ;*
- 4. Introduction d'un déséquilibre de tension de 3.5% à vide ;*
- 5. Introduction d'un défaut de 6 spires en cc dans la phase 'b' et en présence de déséquilibre ;*
- 6. Elimination du défaut de court-circuit, il reste donc le déséquilibre ;*
- 7. Elimination de déséquilibre et revenons donc à l'état sain.*

Les résultats expérimentaux obtenus sur l'évolution des différents indicateurs sont représentés sur la figure III.31. Ces résultats confirment, d'une manière claire, tous les constats tirés de cette étude.

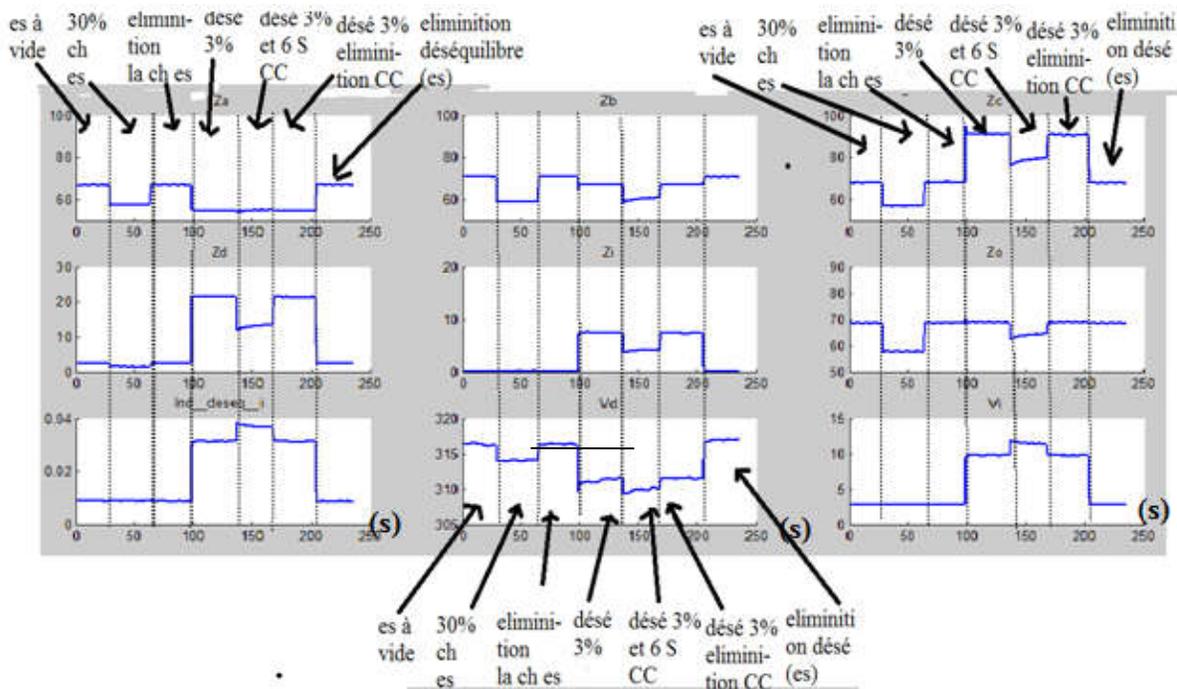


Fig. III.32: Evolution des différents indicateurs pour une séquence des évènements

Durant l'évènement (1), on peut affirmer que les tensions d'alimentation sont équilibrées puisque les valeurs de l'indice  $\Delta$  restent inférieures au seuil choisi (0.015). De plus, le moteur n'a pas d'un défaut de CCSP puisque, les impédances statoriques (calculées à partir des amplitudes des harmoniques fondamentaux issus des tensions et courants statoriques) ont presque les mêmes valeurs.

Durant l'évènement (2), l'indice  $\Delta$  est insensible à l'augmentation de la charge. Il reste aussi inférieur au seuil choisi (0.015) ce qui affirme que les tensions d'alimentation sont équilibrées. De plus et malgré la variation de la charge, on peut confirmer que le moteur n'a pas d'un défaut de CCSP puisque, les impédances statoriques ont diminuées simultanément dans le même sens et leurs valeurs restent presque très proches. Les mêmes remarques peuvent être tirées durant l'évènement (3), où on éliminé la charge.

Durant l'évènement (4), l'indice  $\Delta$  est augmenté considérablement ce qui traduit l'apparition d'un déséquilibre de tension. L'absence de défaut CCSP est confirmée par constance de la composante homopolaire  $Z_0$ .

Durant l'évènement (5), l'indice  $\Delta$  est augmenté aussi mais à cause du défaut CCSP et n'ont pas à cause de l'accroissement de la sévérité de déséquilibre. Ceci est justifié par la diminution de  $Z_o$ .

Durant l'évènement (6), l'indice  $\Delta$  et la composante  $Z_o$  reviennent à leurs valeurs précédentes correspondantes à l'évènement (4), ce qui confirme que le moteur n'a pas de défaut de CCSP mais les tensions sont déséquilibrées.

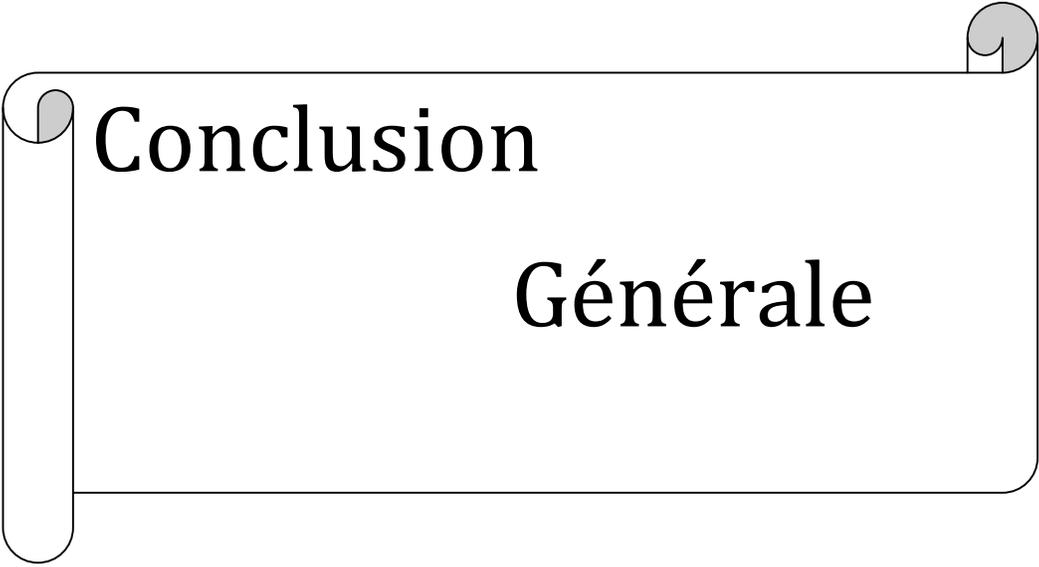
Durant l'évènement (7), tous les indicateurs reviennent à leurs valeurs initiales ce qui signifie que le moteur est à l'état sain.

*Ces tests effectués et les résultats obtenus prouvent la fiabilité de l'ensemble des indicateurs définis et confirment, sans doute, l'efficacité de la méthode proposée que ce soit pour la détection online de défaut de court-circuit entre spires ou pour la distinction entre la présence de ce type de défaut et un déséquilibre de tension d'alimentation.*

### III.9. Conclusion

Dans cet chapitre nous avons appliqué la méthode de FFTFG ce dernier s'est avéré efficace. L'algorithme proposé a permis d'estimer online tous les indicateurs définis. Plusieurs tests expérimentaux ont été effectués. Les résultats obtenus prouvent l'efficacité de la méthode proposée quant à la détection de défaut CCSP et le déséquilibre de tension.

donne de bonne estimation des amplitudes et des fréquences de fondamental des trios courants et les trios tensions statoriques, pour calculer les impédances ( $Z_a, Z_b, Z_c$ ) et les composants symétriques des impédances et des tensions ( $Z_d, Z_i, Z_o$ ) et l'indice de déséquilibre de tension ( $\Delta$ ). et aussi FFTFG a bien suivi de la non-stationnarité de notre signal et c'est très important afin de s'assurer bon travail de nos indicateurs des défauts de court-circuit entre spires statoriques. et en fin nous allons peut-être prendre les indicateurs ( $Z_a, Z_b, Z_c, Z_d, Z_i, Z_o, \Delta$ ) comme indicateurs pour la détection en ligne du défaut de court-circuit entre spires statoriques dans la machine asynchrone, et identifier entre le problème déséquilibre la tension d'alimentation et la variation de la charge.



**Conclusion**

**Générale**

## *Conclusion Générale*

Le travail qui a été présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone à cage d'écureuil, dans ce travail on a représenté la détection online de défaut de court-circuit entre spires statoriques par l'analyse des impédances statoriques calculées à partir des amplitudes des harmoniques fondamentaux issus des tensions et courants statoriques..

Nous avons, dans un premier chapitre, rappelé les éléments de constitution de la machine et de préciser les différents défauts pouvant survenir sur ceux-ci, afin de préciser les différents méthodes de diagnostic des défauts.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le contenu spectral du courant statoriques du moteur asynchrone triphasé à cage et on a montré la richesse de ce dernier en harmoniques, tel qu'on a identifié seulement quatre types d'harmoniques : les TH, les RSH, les **EFH** et RBFH et on a montrons que le défaut de court-circuit entre spires statoriques n'a pas de signatures fréquentielles propres dans le spectre du courant statoriques.

Dans ce dernier chapitre, nous avons proposé une méthode basée sur la technique de la FFT à fenêtre glissante pour la détection de la présence d'un défaut de court-circuit entre spires statoriques , et distinguer entre eux et le problème de déséquilibre de tension d'alimentation et la variation de la charge via l'ensemble des indicateurs proposés ( $Z_a$  , $Z_b$  , $Z_c$  , $Z_d$  , $Z_o$  , $\Delta$ ). et aussi FFTFG a bien suivre de no stationnarité de notre signal et cette très important afin de s'assurer bon travail de notre indicateurs des défaut de court-circuit entre spires statoriques . et en fin nous allons peut être prennent les indicateurs comme indicateurs pour détection Online le défaut CCSP dans la machine asynchrone , et identifier entre le problème déséquilibre la tension d'alimentation et variation de la charge.

**Bibliographie**

**[ROU09]** : ROUAIBIA Reda « DETECTION ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MOTEURS ASYNCHRONES » MEMOIRE Magister Département de Génie Electrique UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA Année 2009

**[SAH10]**: SAHRAOUI, Mohamed, « Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones », Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2010.

**[TAL18]** : TALHA Mouhamed El-Amine « Détection des défauts d'excentricité dans les MAS par traitement de signal du courant statorique » Mémoire MASTER Département de Génie Electrique Université de Biskra, 2018.

**[SAD15]** : SADKI Nour elhouda »SIMULATION DES DÉFAUTS STATORIQUE D'UN MOTEUR A ASYNCHRONE » Mémoire MASTERACADEMIQUE ,département d'électrotechnique Université de Ouargla ,2015.

**[YAH12]** : YAHIA, Khaled, « Contribution au diagnostic de la Machin Asynchrone Triphasée par une Approche Signal », Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2012.

**[MAB17]** : Mabrouk Abd Elhamid « Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone En Présence De Variation De Charge » Thèse de doctorat, département Electrotechnique, Université de Biskra, 2017.

**[KHA15]**: Khabouri, Houssam, « Estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone par la méthode de FFT », Mémoire de Master, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2015.

**[THO01]**: *W.T. Thomson, M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," IEEE Industry Applications Magazine, july/August 2001.*

**[LAA18]**: LAADJAL, Khaled, «Contribution au diagnostic des défauts dans les condensateurs électrolytiques: Applications aux convertisseurs DC-DC», Thèse de doctorat, département Electrotechnique Biskra, 2018.

**[GAB]**: Gabriel Cormier « Circuits triphasés déséquilibrées ».chapitre 4, [http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier\\_gabriel/Electrotechnique/Chap4.pdf](http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/Electrotechnique/Chap4.pdf)

**[AME18]** : Tarek AMEID « Intitulé Contrôle et Diagnostic de la Machine à Induction » Thèse de doctorat, département Electrotechnique Biskra, 2018.