



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 :  
**ROUAHNA Brahim**

Le : Lundi 25 Juin 2018

## Détection de défaut de court-circuit entre spires statoriques dans les MAS par l'analyse des impédances statoriques

---

### Jury :

Dr	HAMMOUDI Med. Yacine	MCB	Université de Biskra	Président
Dr	SAHRAOUI Mohamed	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Dr	DERGHAL Hamid	MAA	Université de Biskra	Examineur

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : **Commande électrique**

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

*Thème*

Détection de défaut de court-circuit entre spires statoriques  
dans les MAS par l'analyse des impédances statoriques

Présenté par :

**ROUAHNA Brahim**

Avis favorable de l'encadreur :

*SAHRAOUI Mohamed*

*Signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

**HAMMOUDI Med.Yacine**

*Signature*

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : **Commande électrique**

## *Thème :*

# Détection de défaut de court-circuit entre spires statoriques dans les MAS par l'analyse des impédances statoriques

**Proposé par : ROUAHNA Brahim**

**Dirigé par : SAHRAOUI Mohamed**

## **RESUMES**

L'analyse des signaux du courant statorique du moteur asynchrone (MCSA) est devenue une technique très répandue pour apprécier l'état de santé du moteur asynchrone afin d'éviter la défaillance totale et n'intervenir qu'à bon instant et pendant des arrêts programmés de production. Les techniques classiques de traitement du signal et de détection de la défaillance dans les machines tournantes, basées sur l'analyse de Fourier ont prouvées leurs limitations dans le cas des signaux non stationnaires, ce qui nécessite l'utilisation des nouvelles techniques donnant une analyse plus performante.

Dans ce travail, nous avons proposé l'application de la méthode FFTFG sur les tensions et les courants issus d'un moteur asynchrone à cage, dont le but est l'estimation des trois impédances statoriques. Ces impédances ont été exploitées pour définir des indicateurs permettant une détection fiable de défaut de court-circuit entre spires. Une étude expérimentale sur l'effet de la variation de la charge, ainsi que le déséquilibre de tension d'alimentation sur les indicateurs définis, a été aussi effectuée. Les résultats obtenus montrent qu'un bon diagnostic de défaut de court-circuit, nécessite la combinaison entre plusieurs indicateurs afin d'éviter les fausses alarmes qui peuvent être enclenchées soit à cause d'une variation dans la charge ou un déséquilibre imposé par réseau d'alimentation.

## المخلص.

أصبح تحليل تيار الجزء الثابت للمحرك الغير متزامن تقنية جديدة تستخدم على نطاق واسع لتقييم حالة المحرك غير المتزامن من اجل معرفة حالة المحرك من اجل تجنب الفشل، والتدخل عند الضرورة فقط أي قبل انقطاع وتيرة العمل. إن اغلب التقنيات التقليدية في معالجة الإشارات والكشف عن الخطأ في الآلات الدوارة تعتمد على طريقة فوريي التي أثبتت محدوديتها في تشخيص والكشف عن العطب، الأمر الذي تطلب استخدام تقنيات جديدة عليها تعطي تحليلا أكثر كفاءة .

في هذا العمل استخدمنا تقنية تحويل فوريي ذات نافذة متحركة على التوتر والتيار المأخوذان من المحرك غير متزامن للجزء الثابت لتقدير العناصر المتناظرة التي استعملناها كمؤشر للكشف عن الخلل ووجود دارة قصيرة بين لفات الجزء الثابت، وتشخيص الأخطاء هو من خلال ملاحظة الاختلافات في المؤشر (العناصر المتناظرة) في طيف التيار المأخوذ من الجزء الثابت للمحرك الغير متزامن، والذي هدفه حساب الممانعات الجزء الثابت. هذه الممانعة استعملت لمعرفة مؤشرات تسمح بكشف دقيق للخطأ لدارة قصيرة بين الالتفافات اللولبية. دراسة تجريبية على حالة لتغير الحمولة، وأيضا اختلال توتر للمولد الكهربائي على المؤشرات المعرفة والمعنية، النتائج المتحصل عليها تبين تشخيص جيد على خلل لدارة قصيرة. تشترط تنسيقا بين العديد من المؤشرات من أجل منع التنبهات الخاطئة التي يمكن أن تكون مشبكه سواء بسبب تغير في الحمولة أو اختلال التوتر للمولد الكهربائي.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire :*

✚ *A mon père, à ma mère*

✚ *A mes frères*

✚ *A mes sœurs*

✚ *A tous mes amis (es)*

✚ *A tous mes maîtres et professeurs : du primaire au supérieur*

✚ *A tous ceux qui ont contribué au développement des sciences en général et de l'électrotechnique en particulier.*

**BRAHIM.ROUAHNA**

# Remerciements

*Je remercie, avant tout, Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé parmi Ses innombrables Grâces, santé et courage pour accomplir ce travail.*

*Mes plus vifs remerciements vont à mon encadreur pour sa disponibilité et la qualité de son encadrement, SAHRAOUI MOHAMED, Maître de conférences à l'Université Mohamed Khider de BISKRA. .*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury de soutenance de ce mémoire*

*Pr. HAMMOUDI Med.Yacine, d'avoir accepté la présidence de jury de soutenance.*

*Pr.DERGHAL HAMID, pour avoir accepté d'examiner mon travail et faire partie du jury.*

*Je n'oublierai pas d'exprimer un profond respect à tous mes professeurs qui m'ont inculqué les fondements scientifiques tout au long des cursus de mon étude.*

*Mes derniers mots s'adressent tous particulièrement à ma famille : mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs*

# *Liste des tableaux*

## **Chapitre II : Contenu spectral du courant statorique.**

**Tab. II.1** Les harmoniques du courant statorique.....17

## **CHAPITRE III : Détection défaut de court-circuit entre spires par méthode FFTFG**

**Tab. III.1.** six indicateurs issus de l'analyse des impédances statoriques.....47.

# Liste de figures

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralité sur la machine asynchrone.

**Fig. I.1 :** Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil .....3

**Fig. I.2:** Vue schématique des constituants du stator.....4

**Fig.1.3 :** Vues schématiques de rotors.....5

**Fig. I.4 :** Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur

Asynchrone.....6

**Fig. 1.5 :** Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone.....7

**Fig. 1.6:**Exemples de dégâts aux stators et rotor dus au défaut de roulement d'un MSA...7

### Chapitre II : Contenu spectral du courant statorique

**Fig. II. 1:** Représentation temporelle vers fréquentielle.....14

**Fig. II. 2 :** bond d'essais expérimental .....16

**Fig. II.3.** Spectre du courant  $i_A$  à l'état sain en 100% de la charge nominale, avec les quatre Familles des harmoniques (a.TH, b. RSH, c. EFH, d. RBFH).....18

**Fig. II. 4:** représentation d'un court-circuit entre spires d'une bobine statorique .....19

**Fig. II.5 :** Schémas simplifié montrant les prises réalisées pour faire des courts-circuits

Entre différents nombres de spires de l'enroulement **W1-W2**..... 21

**Fig. II.6 :** Spectre linéaire du courant  $i_A$  à l'état sain et avec 18 spires en court-circuit en mi Charge, moteur 3kW (visualisation des premiers harmoniques du temps)..... 23

**Fig. II.7 :** Spectre linéaire du courant  $i_A$  à l'état sain et avec 48 spires en court-circuit en mi Charge, moteur 3kW (visualisation des premiers harmoniques du temps).....23

**Fig. II.8 :** Spectre linéaire du courant  $i_A$  à l'état sain et avec 18 spires en court-circuit

## *Liste de figures*

En mi charge, moteur 3kW (visualisation des TH, RSH, RBFH et EFH).....	24
<b>Fig. II.9</b> : Spectre linéaire du courant $i_A$ à l'état sain et avec 48 spires en court-circuit En mi charge, moteur 3kW (visualisation des TH, RSH, RBFH et EFH).....	25
<b>CHAPITRE III : Détection défaut de court-circuit entre spires par méthode FFTFG</b>	
<b>Fig. III.1</b> : Méthode de FFT à fenêtre glissante.....	27
<b>Fig. III.2</b> : Séquence directe .....	28
<b>Fig. III.3</b> : Séquence inverse .....	28
<b>Fig. III.4</b> : Séquence homopolaire.....	29
<b>Fig. III.5</b> : Détection défaut de court-circuit entre spires par méthode FFTFG.....	31
<b>Fig. III.6</b> : L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état sain.....	33
<b>Fig. III.7</b> : Fréquence estimée du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état sain.....	34
<b>Fig. III.8</b> : l'amplitude estimée de la composante fondamentale du courant à l'état sain.....	34
<b>Fig. III.9</b> : l'amplitude estimée de la composante fondamentale de la tension à l'état sain...	35
<b>Fig. III.10</b> : les impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone à L'état Sain.....	35
<b>Fig. III.11</b> : Les composantes symétriques estimées du Signal réel d'un moteur Asynchrone à l'état sain.....	36
<b>Fig. III.12</b> : L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état Défaut de court circuit entre spires statorique.....	37
<b>Fig. III.13</b> : les courants estimés du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état Défaut de court circuit entre spires statorique.....	38
<b>Fig. III.14</b> : les Tension estimés du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état Défaut de court circuit entre spires statorique.....	38

## *Liste de figures*

<b>Fig. III.15:</b> les impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état Défaut de court circuit entre spires statorique.....	39
<b>Fig. III.16:</b> Les composantes symétriques directe, inverse et homopolaire des Impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état défaut de court Circuit entre spires statorique.....	39
<b>Fig. III.17 :</b> L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état De différent charge.....	41
<b>Fig. III.18:</b> les courants estimés du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état De variation de la charge.....	42
<b>Fig. III.19:</b> les impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état De variation de la charge.....	42
<b>Fig. III.20:</b> La composante symétrique directe et inverse et homopolaire des Impédances estimée du Signal.....	43
<b>Fig. III.21 :</b> L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état sain Et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.....	44
<b>Fig. III.22 :</b> Les courants estimés du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état Sain et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.....	45
<b>Fig. III.23 :</b> Les tensions estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état sain Et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.....	45
<b>Fig. III.24 :</b> Les impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état Sain et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.....	46
<b>Fig. III.25 :</b> La composante symétrique directe et inverse et d'impédance estimée du Signal Réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état sain et défaut de déséquilibre de tension .....	46

## *Liste de figures*

**Figure. III.26.** la séparation entre un défaut de court-circuit entre spires et un problème de déséquilibre de tension ou variation dans la charge.....48.

# *Sommaire*

# Sommaire

---

## Sommaire :

Introduction générale.....	1.2
<b>Chapitre I : Généralité sur la machine asynchrone</b>	
<b>I.1</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Construction de la machine.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.1 Stator.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2 Rotor.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.3 Organes mécaniques.....</b>	<b>5</b>
<b>I. 3. Principaux défauts de la machine asynchrone, causes et conséquences .....</b>	<b>5</b>
<b>I. 3. 1. Défauts statoriques .....</b>	<b>5</b>
<b>I. 3. 2. Défauts rotoriques .....</b>	<b>6</b>
<b>I.4. Terminologies de diagnostic .....</b>	<b>8</b>
<b>I.4.1. Diagnostic .....</b>	<b>8</b>
<b>I.4.2.Défauts .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.3.Défaillance .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.4.Dégradation .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.5.Panne .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.6.Signes .....</b>	<b>9</b>
<b>I. 5. Approches de diagnostic de défauts dans la machine asynchrone .....</b>	<b>9</b>
<b>I.5.1. Approche signal .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.1.1. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.1.2. Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.1.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.1.4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5.1.5. Diagnostic par l'analyse du courant statorique .....</b>	<b>12</b>

# Sommaire

---

I.5.1.6. Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park .....	12
I.5.1.7. Diagnostic par l'analyse du module du vecteur de Park .....	12
I.5.1.8. Diagnostic par l'analyse des puissances instantanées .....	12
I. 5. 2. Approche modèle .....	12
I.6. Conclusion.....	13
<b>CHAPITER II : Contenu spectral du courant statorique</b>	
II.1 Introduction.....	14
II.2.Transformée de Fourier rapide (FFT) .....	14
II.3.Différentes familles d'harmoniques existant dans le spectre du courant statorique.	15
II.4.Etude de spectre du courant statorique avec défaut de court circuit entre spires...	19
II.5. Résultats.....	21
II.6. Conclusion.....	26
<b>CHAPITER III : Détection défaut de court-circuit entre spires par méthode FFTFG</b>	
III.1. Introduction .....	27
III.2.Algorithme de FFT à fenêtre glissante (FFTFG) .....	27
III.3. Composantes Symétriques .....	28
III.3.1. Système direct .....	28
III.3.2. Système inverse .....	28
III.3.3. Système homopolaire .....	29
III.4. Les composantes symétriques des impédances .....	30
III.5. Détection défaut de court-circuit entre spires par méthode FFTFG.....	30
III.6. Application sur le moteur .....	32
III.7. L'étude expérimentale .....	32
III.7.1. Étude le moteur à l'état sain .....	33

# Sommaire

---

<b>III.7.2.</b> Étude du moteur en présence de défaut de court-circuit entre spires statoriques....	37
<b>III.7.3.</b> Test de robustesse de la technique proposée .....	41
<b>III.7.3.1.</b> Effet de la diminution brusque de la charge sur les indicateurs de défaut de cc....	42
<b>III.7.3.2.</b> Effet de déséquilibre de tension d'alimentation sur les indicateurs de défaut de court circuit.....	45
<b>III.7.4.</b> <i>Interprétation des résultats</i> .....	47
<b>II.6. Conclusion</b> .....	49
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	50
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	51

***Introduction***

***Générale***

# *Introduction Générale*

---

## **Introduction générale**

Les machines asynchrones sont largement utilisées dans l'industrie. La machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil est la plus fréquemment utilisée grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction et son faible coût. Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermique, électrique, mécanique et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celles-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables, obligeant les chercheurs à mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats. Assurer leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenance préventive et corrective. En effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations.

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic fait partie de la surveillance. Il a pour objectif de détecter d'une façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale de l'installation industrielle. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence des défauts, tandis que la localisation a pour objet de trouver le type de défaut.

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil, précisément sur le défaut de court circuit entre spires statorique avec les méthodes de traitement du signal. Notre travail est basé sur l'analyse des courants et tensions statoriques avec la méthode de FFT avec sa version modifiée, avec des indicateurs de défaut de court-circuit entre spires statorique basé sur les impédances et les composants symétriques.

L'étude a été répartie en trois chapitres :

◆ Dans le premier chapitre, on présentera une terminologie sur la maintenance et le diagnostic des systèmes, constitution de la machine asynchrone, les différents défauts au niveau de la machine asynchrone leurs origines, causes et leurs conséquences. Par la suite, on verra les différentes techniques utilisées pour la détection des défauts.

# *Introduction Générale*

---

◆ Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différentes familles d'harmoniques qui existent dans le spectre du courant statorique basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT).

On tentera donc d'expliquer le défaut de court circuit entre spires et résultats expérimentaux sur le spectre du courant statorique avec la présence de défaut de court circuit entre spires.

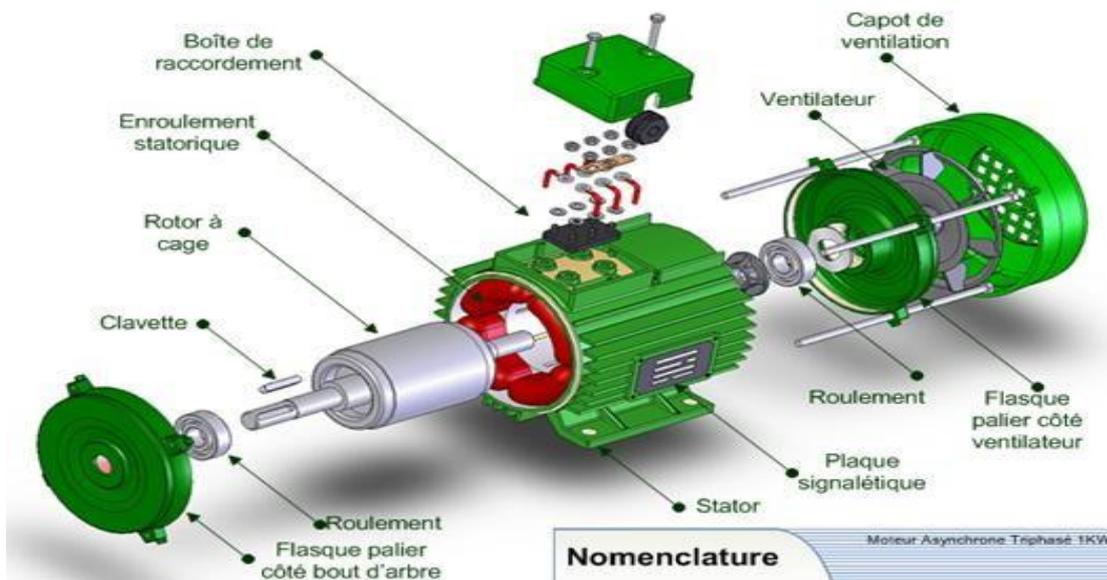
◆ Pour le troisième chapitre, on exposera la méthode de FFTFG, le test de la méthode sur le moteur éta sain, pour terminer avec l'application de cette dernière sur des signaux générés. Enfin, c'est la partie pratique. Il sera question d'abord, de développer la méthode avec des indicateurs pour la détection des défauts. Ensuite, on appliquera la méthode de FFTFG sur des signaux réels, calque états des fonctionnements de moteur (état sain, état défaut de court circuit entre spires statorique, la diminution brusque de la charge et le cas de déséquilibre dans la source de tension).

***CHAPIER I***  
***Généralité sur***  
***La***  
***Machine asynchrone***

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre, Après avoir rappelé des éléments sur la constitution de la machine asynchrone triphasés à cage, une analyse des différents défauts pouvant apparaître dans cette machine et les techniques de diagnostic à base de traitement du signal utilisées pour la détection de ces défauts. Nous discutons aussi des méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone.

## I.2. Construction de la machine



**Fig. I.1** : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écuréuil. [AZO17]

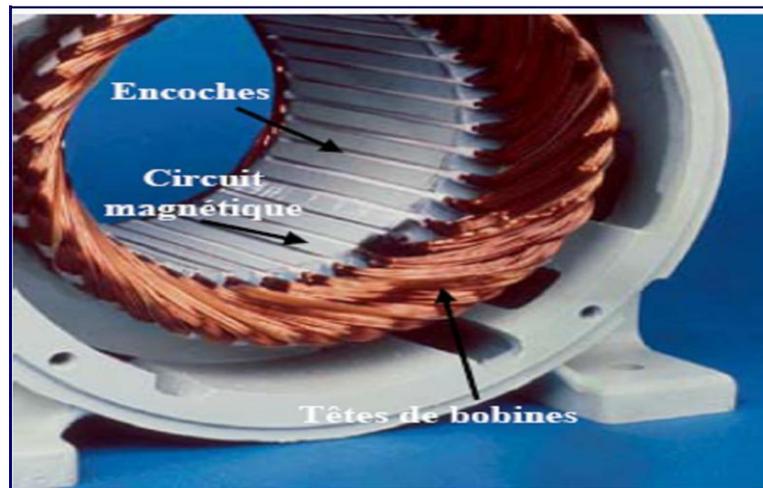
La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer;
- le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement ;
- les organes mécaniques permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

### I.2.1 Stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles sur lesquelles sont découpées des encoches parallèlement à l'axe de la machine (voir figure I.1). Le bobinage statorique peut être décomposé en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de

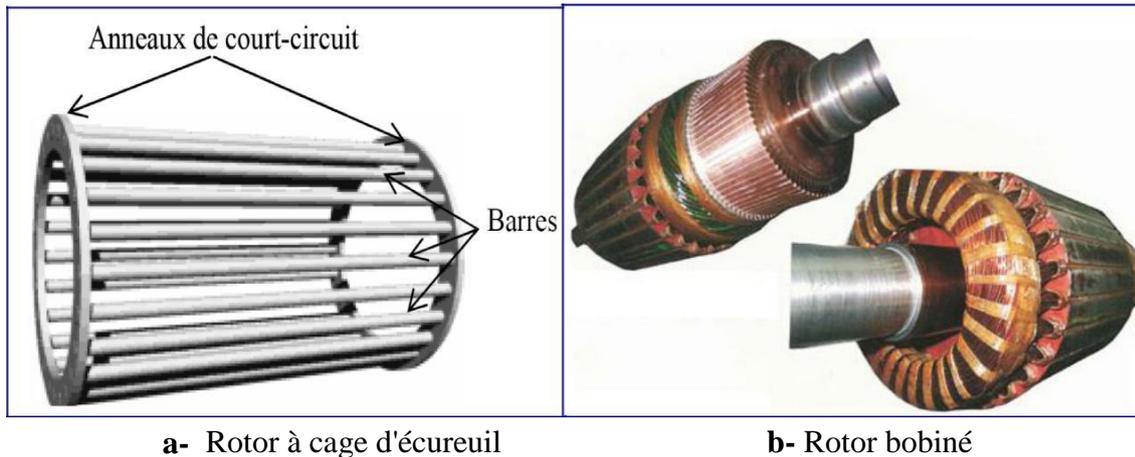
bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant une circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre pour obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus Sinusoïdale possible, et ainsi limiter les ondulations du couple électromagnétique.



**Fig. I.2** Vue schématique des constituants du stator [YHY12]

### I.2.2 Rotor

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation du courant d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices régulièrement réparties, constituent la cage circuit du rotor (figure I.3.a). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné (figure I.3.b). Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les barres conductrices sont réalisées par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre perforées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient se trouve réduit. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.



**Fig. I.3** Vues schématiques de rotors [GAO12]

### 1.2.3 Organes mécaniques

La carcasse servant de support joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend 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. Son dimensionnement est fonction des efforts de Flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc....), des efforts Radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, dépend de torsion (couple électromagnétique Transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et lui assurent une rotation libre. Le second palier assure 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 petites et moyennes puissances.

## I. 3. Principaux defaults de la machine asynchrone, causes et conséquences

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception (mauvais choix des matériaux), d'une mauvaise fabrication (défauts d'usage) ou d'un mauvais montage (serrage, désalignement) du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone.

**I. 3. 1. Défauts statoriques :** défaut de court-circuit entre phases statoriques ou entre spires d'une même phase, défaut d'ouverture d'une phase ou défaut du circuit magnétique statorique (ruptures de tôles).

**I. 3. 2. Défauts rotoriques :** défaut de cassure de barres ou d'anneaux de court-circuit, défaut du circuit magnétique rotorique (ruptures de tôles), défaut de roulements, défaut d'excentricité statique et/ou dynamique. [YHY12]

Des études statistiques ont montrée que les pannes statorique et rotorique (sans prendre en considération les défauts de roulements) représentent entre 33 % et 46 % des pannes totales. Malgré que la probabilité d'occurrence des défauts de cassure de barres rotoriques ou d'excentricité est moins que la probabilité d'occurrence des défauts de roulements, ses vitesse de propagation et d'évolution est rapide conduisant aux autres problèmes majeurs dans l'installation globale. Il est donc logique, du point de vue scientifique et industriel, de concentrer les efforts sur la surveillance et le diagnostic de ces défauts. [YHY12]

**La figure I.4** représente deux exemples de dégâts provoqués par le défaut de court-circuit au stator. Les courts-circuits statoriques commencent généralement par un court-circuit localisé entre plusieurs spires d'un même enroulement (court-circuit entre spires), suite à la dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs. Ce type de phénomène peut de plus dégénérer en courts-circuits généralisés, comme des courts-circuits entre phases ou entre phase et terre.



**Fig. I.4 : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone.**

Ces défauts sont généralement facilement détectables tant les effets qu'ils engendrent, sur les courants de phase notamment, sont importants. Les défauts de courts-circuits entre spires, quant à eux, sont plus difficilement perceptibles à travers la seule observation directe des courants de ligne, ce qui augmente les difficultés liées à leur détection.

La figure **I.5** : représente le rotor à cage d'un moteur asynchrone triphasé où il est clair une barre cassée. Ce défaut doit être détecté rapidement afin de garantir un fonctionnement fiable du moteur et donc de l'installation globale et d'éviter sa propagation sur les autres barres rotoriques.

La figure **I.6** : montre un dégât grave provoqué par un défaut de roulement dans un moteur asynchrone triphasé à cage. On voit bien que le rotor est collé avec le stator provoquant une grande déformation des circuits magnétiques statorique et rotorique. Un défaut d'excentricité peut aussi engendrer les mêmes effets présentés dans la figure **I.6**.



**Fig. I.5 : Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone**



**Fig. I.6: Exemples de dégâts aux stators et rotor dus au défaut de roulement d'un MSA**

Ces défauts peuvent avoir pour origines des causes de nature très différentes, souvent reliés les uns aux autres:

- Causes thermiques : balourds, points chauds, température ambiantes élevée, ...
- Causes électriques : transitoire d'alimentation, déséquilibres, ...
- Causes mécaniques : chocs en service, vibrations, jeux, ...

- Causes chimiques : corrosion, humidité, ...

La diversité des défauts et des causes possibles entraînant une panne dans la machine asynchrone, augmente la difficulté de diagnostic de la nature et la localisation de cette panne. Un diagnostic fiable, nécessite donc une bonne connaissance des conséquences des défauts à surveiller, ainsi que leurs signatures sur les signaux issus de la machine. Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts : [GAO05]

-Appel supplémentaire de courant et fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.

-Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.

-Augmentations des arrêts non programmés et des pertes de production.

#### **I.4. Terminologies de diagnostic**

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

##### **I.4.1. Diagnostic**

De nombreuses définitions sont proposées pour le terme de diagnostic, première définition 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 a pour objet d'identifier le type de défaut [SHR10]. Deuxième définition celle du dictionnaire Robert celle du dictionnaire Robert est rigoureusement étymologique : « action de déterminer une maladie d'après ses symptômes ». L'origine de ce mot provient de deux mots grecs, « dia » qui signifie « par » et « gnosis » qui signifie « connaissance ». Dans l'industrie, le diagnostic est défini par l'ensemble d'actions visant à évaluer un procédé (système) et identifier la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test de son fonctionnement. Le diagnostic est en principe défini comme un processus à trois phases :

-détection du mode de fonctionnement.

-qualification du mode de fonctionnement.

-décision à partir de la reconnaissance du mode de fonctionnement. [GAO12]

### I.4.2.Défauts

Un défaut est une anomalie de fonctionnement d'un système physique. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en absence de défauts. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même.

### I.4.3.Défaillance

Evénement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement ses fonctions. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique théorique. Par contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa mission principale.

### I.4.4.Dégradation

C'est le processus qui amène à état défaillant du système

### I.4.5.Panne

Lorsque plus aucune fonction n'est assurée le terme de panne est employé à la place du terme défaillance.



### I.4.6.Signes

Un défaut est perceptible au travers d'un signe, caractère manifestant un état comportemental anormal. Un signe est caractérisé par un ensemble d'observations en provenance d'un système physique. Il est révélateur de la présence d'un défaut. [GAO12]

## I. 5. Approches de diagnostic de défauts dans la machine asynchrone

D'une manière générale, lors de défauts statoriques ou rotoriques d'une machine électrique, la topologie de la machine est modifiée, ce qui implique la modification de

certaines grandeurs caractérisant l'état de la machine. Les manifestations de ces défauts sont perceptibles : [YHY12]

- soit par l'intermédiaire de modifications des propriétés de certains signaux que l'on peut capter sur le dispositif ;
- soit par l'intermédiaire de modifications de certains paramètres physiques du dispositif.

Ces deux possibilités conduisent à définir deux classes de méthodes de surveillance et de diagnostic: une approche dite signal et une approche dite modèle.

### I.5.1. Approche signal

Le principe de la détection des défauts par une approche signal repose sur l'existence, en cas de défaut, de propriétés particulières de certains signaux physiques prélevés sur la machine en fonctionnement. A partir de modèles de signaux, établis analytiquement, ou à partir de simulation, des signatures témoignant de la présence d'une défaillance peuvent être établis. De nombreux travaux exploitent ces principes en recherchant, par des techniques appropriées de traitement de signal, à extraire ces signatures, permettant ainsi de confirmer la présence d'un défaut dans les machines asynchrones. Parmi les méthodes appartenant à cette approche, on peut citer :

#### I.5.1.1. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (I.1)$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la force Magnétomotrice ( $F_{mm}$ ) et de la perméance ( $P$ ).

$$\psi_s = F_{mm} \cdot P \quad (I.2)$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations issus du moteur avec défaut sont comparés avec ceux de références enregistrées

lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer. Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode.

#### **I.5.1.2. Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite**

Dans une machine idéale et sans défauts, les courants et tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axiaux de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine peut être exploité pour détecter les différents défauts.

#### **I.5.1.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites**

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que de non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées. Cependant, l'application de cette technique est impossible lorsqu'il s'agit d'un moteur appartenant à une chaîne de production.

#### **I.5.1.4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient majeur de cette méthode.

#### **I.5.1.5. Diagnostic par l'analyse du courant statorique**

L'analyse des signatures du courant statorique par la transformée de Fourier rapide (*TFR*) est considérée comme référence dans le diagnostic des défauts dans les machines

asynchrones. Elle consiste à détecter les défauts par la détection de l'apparence de composantes fréquentielles révélatrices des défauts dans le spectre du courant statorique. Cette méthode est très utilisée car elle est simple, peu coûteuse et facile à exécuter. Elle permet de détecter aussi bien les défauts électriques que mécaniques. [YHY12]

#### **I.5.1.6. Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park**

La méthode du vecteur de Park est également considérée comme l'une des méthodes populaires dans le diagnostic des défauts. Cette méthode utilise les grandeurs biphasées  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation pour l'obtention de la courbe de vecteur de Park:  $i_{qs} = f(i_{ds})$ . Cette méthode consiste à identifier et étudier l'apparence elliptique correspondant à la représentation du vecteur de Park.

#### **I.5.1.7. Diagnostic par l'analyse du module du vecteur de Park**

Cette méthode est appelée l'approche étendue du vecteur de Park, (*EPVA en anglais*). Elle est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques et Rotoriques.

#### **I.5.1.8. Diagnostic par l'analyse des puissances instantanées**

L'utilisation des puissances instantanées pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones a fait l'objet des nombreux travaux. Les puissances instantanées sont la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Le niveau d'informations apporté par ces grandeurs est donc plus grand que celui apporté par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques et électriques.

### **I. 5. 2. Approche modèle**

Le principe de la détection de défauts par une approche modèle repose sur la comparaison du comportement réel de la machine avec celui fourni par un modèle de représentation de la machine auquel sont appliquées les mêmes excitations qu'au système réel. La forme du modèle utilisé peut prendre plusieurs formes. Il peut être simplement basé sur une représentation en régime sain de la machine ou inclure dans sa formulation des éléments supplémentaires relatifs au défaut surveillé. Dans tous les cas, le principe de comparaison entre un dispositif surveillé et un modèle fait apparaître des différences comportementales de certaines grandeurs caractéristiques liées au fonctionnement de la machine. Ces différences sont appelées résidus. Ces résidus sont alors utilisés comme entrées d'un processus de détection des défauts. [YHY12]

Trois grandes approches de génération de résidus se sont développées:

1. Approche à base d'observateurs.
2. Approche par projection dans l'espace de parité.
3. Approche par estimation paramétrique.

### **I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présentés des notions très importantes en diagnostic et nous avons présentés de manière générale les parties principales qui constituent la machine asynchrone, tels que les défauts pouvant affecter la machine asynchrone, leurs causes et leurs conséquences ainsi que les méthodes utilisées en diagnostic. Notre travail est consacré à l'étude et à la détection des défauts de court-circuit entre spires statoriques par l'analyse de courant par la méthode de FFT. Le chapitre suivant sera consacré à étudier le défaut de court-circuit entre spires. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

# ***CHAPITER II***

***Contenu spectral***

***Du***

***Courant statorique***

**II.1 Introduction:**

Comme nous l'avons vu précédemment dans le premier chapitre généralité sur la machine asynchrone « constitution de la machine asynchrone, les différents défauts au niveau de la machine asynchrone, leurs origines, leurs causes et leurs conséquences. Par la suite, les différentes techniques utilisées pour la détection des défauts. Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes familles d'harmoniques qui existent dans le spectre du courant statorique en utilisant la Transformée de Fourier Rapide (FFT).

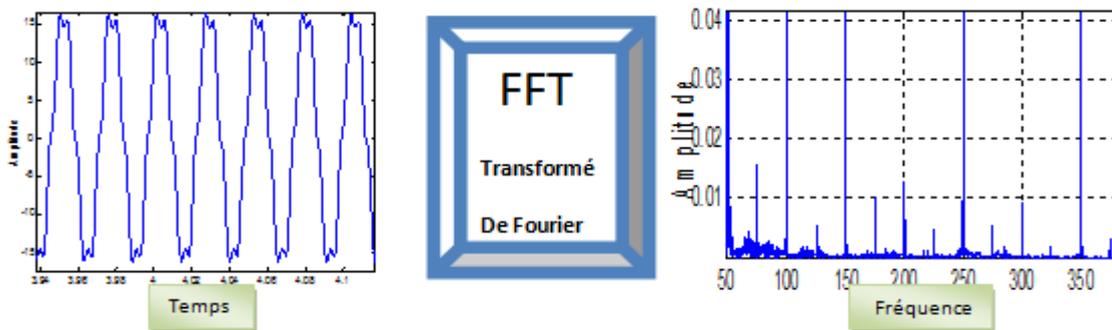
**II.2.Transformée de Fourier rapide (FFT)**

Considérons le signal  $X(t)$  à temps continu. Si  $X$  est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence  $f$  est la suivante :

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

Son inverse est donné par :

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



**Fig. II. 1:** Représentation temporelle vers fréquentielle

Sa transformé de Fourier discrète de N point avec une période d'échantillonnage T est donnée par :

$$X\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} x(KT) e^{-j\frac{2\pi fKT}{NT}} \tag{II.3}$$

Et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} X\left(\frac{f}{NT}\right) e^{j\frac{2\pi fKT}{NT}} \tag{II.4}$$

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de point  $N$  égal une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discret de  $\frac{N}{\log_2(N)}$

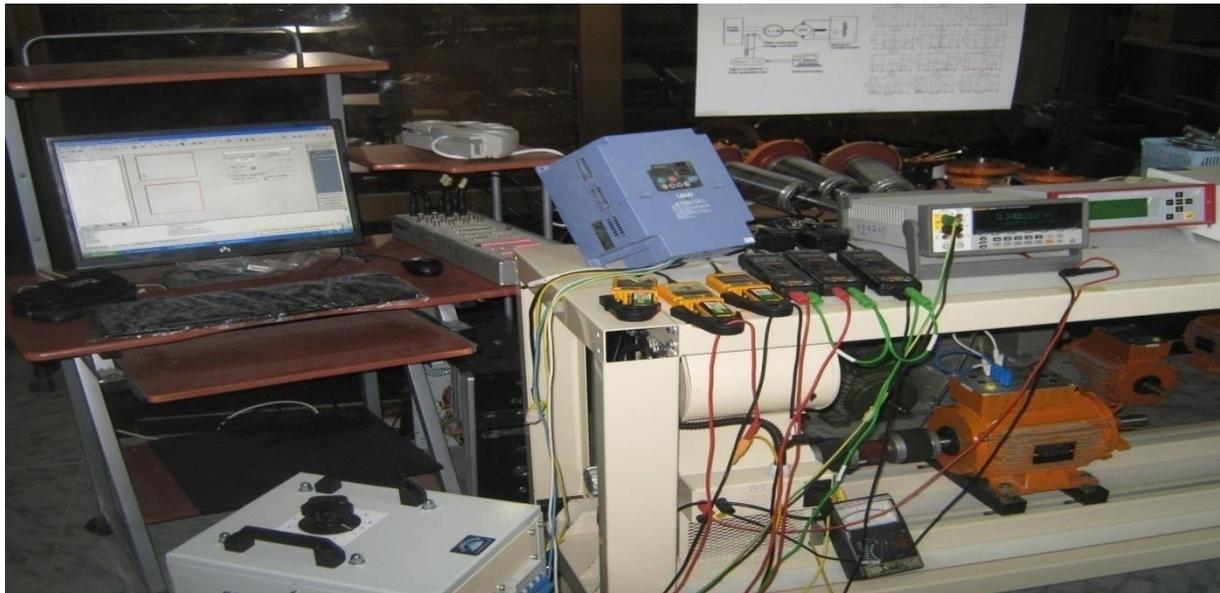
Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal  $\mathbf{x}(t)$ . En effet, la FFT décompose le signal  $x(t)$  sur une base de vecteurs propres sinusoidaux

( $e^{2\pi f k T}$ ) Malheureusement ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps cependant en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour proèdre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing) . il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la transformée de Fourier à chaque tranche. [CHE 14].

### II.3. Différentes familles d'harmoniques existant dans le spectre du courant statorique

Dans ce travail, on s'intéresse à l'utilisation d'une méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT) (outil mathématique très utilisé); qui permet de décrire les signaux temporels par leur spectre de fréquence. Une étude analytique sur la machine asynchrone afin d'interpréter le contenu harmonique des courants statoriques pendant l'état sain a été effectué. Notre étude théorique a été vérifiée par des essais expérimentaux (sur un moteur de 3kW, le stator est constitué de 48 encoches alors que le rotor se compose de 28 barres en Aluminium) réalisés au niveau du laboratoire LGE de Biskra. Les résultats obtenus mettent en évidence la richesse en harmoniques du courant statorique. Jusqu'à maintenant, on a identifié seulement quatre types d'harmoniques qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique même à l'état sain.



**Fig. II. 2** : bond d'essais expérimental

Généralement, pour analyser un signal par la technique FFT, on doit prendre en compte les paramètres suivants : par exemple les paramètres d'acquisition utilisés lors des essais expérimentaux sont les suivants :

- La fréquence d'échantillonnage :  $F_e = 10000 \text{ Hz}$
- Le nombre des échantillons :  $N_e = 25000 \text{ échantillons}$
- Le temps d'acquisition :  $T_a = N_e / F_e = 2.5 \text{ sec}$
- La résolution fréquentielle:  $df = 1 / T_a = 1 / 2.5 = 0.4 \text{ Hz}$

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

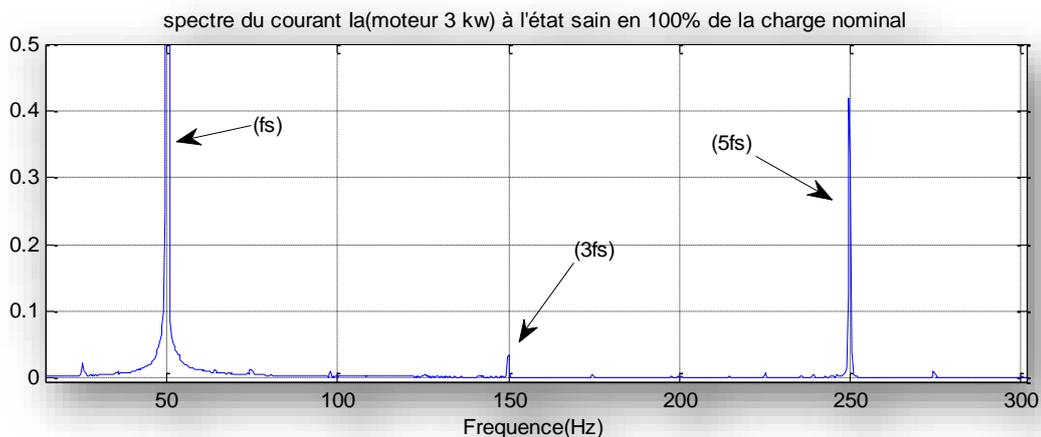
$$x(n) = \sum_{k=1}^{N_e} x(k) e^{-j2\pi k \frac{n}{N_e}} \text{ avec } n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, N_e \quad (\text{II.5})$$

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]

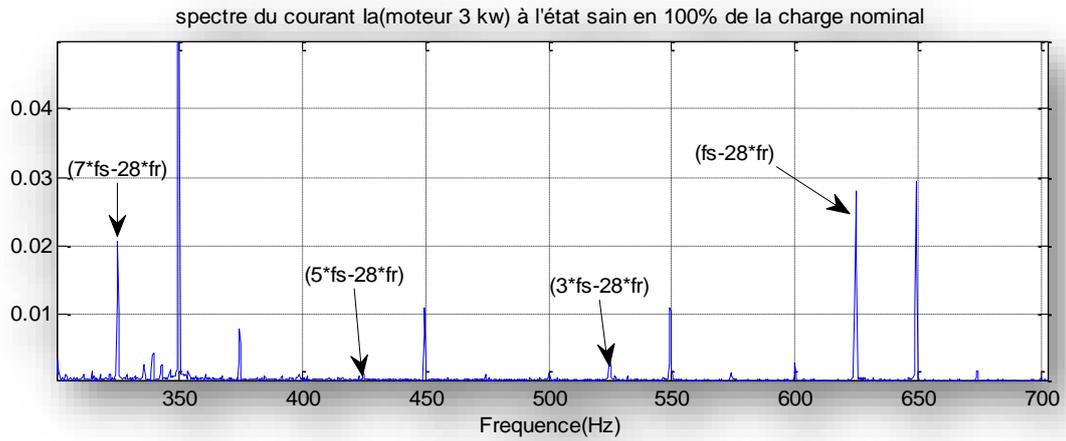
Les différents harmoniques	Les formules globales	Les causes principales
Les harmoniques du temps (TH)	$TH = v. fs$	Ce type d'harmonique est imposé par la source.
Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH)	$RSH = (v. fs \pm Nb * fr)$	De la structure naturelle de la machine asynchrone à cage (la distribution discrète des encoches rotoriques).
Les harmoniques du Excentricité (EFH)	$EFH = (v. fs \pm k * fr)$	Excentricité mixte.
Rotor Bar Fault Harmonics (RBFH)	$RBSH = (v. fs \pm 2.k * g) fs$	L'asymétrie résiduelle de la cage rotorique.

Tab. II.1 Les harmoniques du courant statorique.

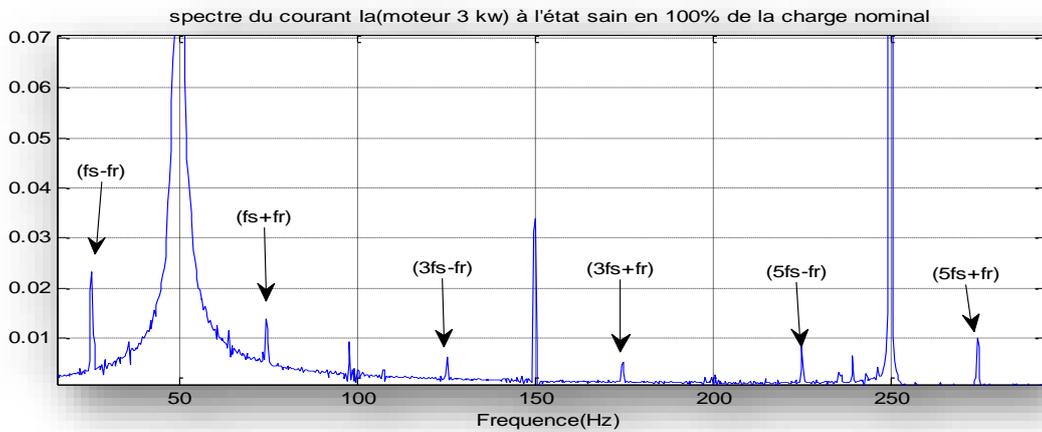
Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots$  ;  $fs = 50$  Hz ;  $Nb = 28$  barres.  $v = (1, 3, 5, 7, 9, \dots)$  Nous exposons sur la Tab. II.1 le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à 100% de la charge nominale ( $g = 0.036$ ) avec la représentation des quatre familles des harmoniques (a. TH, b. RSH, c. EFH et d. RBFH).



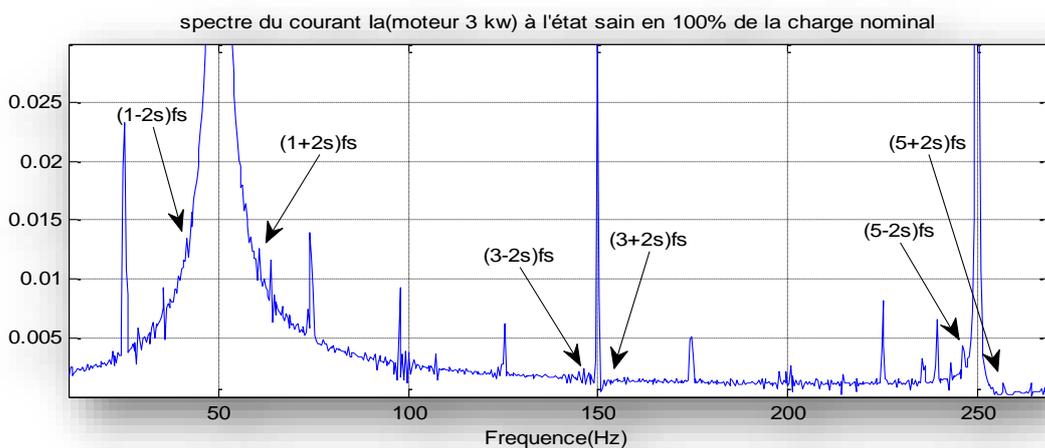
a. Les harmoniques TH



**b. Les harmonique RSH**



**c. Les harmonique EFH**

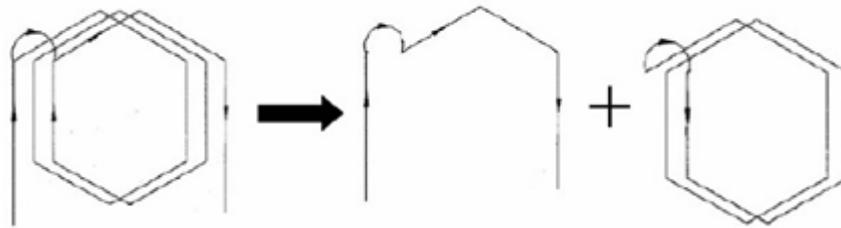


**d. Les harmonique RBFH**

**Fig. II.3.** Spectre du courant  $I_a$  à l'état sain en 100% de la charge nominale, avec les quatre familles des harmoniques (a.TH, b. RSH, c. EFH, d. RBFH).

#### II.4. 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.4**). 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. [SHR10]



**Fig. II. 4:** 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  $\mathbf{I}_{cc}(t)$  de court-circuit aura une amplitude de grande valeur.

$$\mathbf{I}_{cc}(t) = |\hat{\mathbf{I}}_{cc} \sin(wst)| \quad (\text{II.5})$$

Ce courant est en opposition de phase par rapport à  $\mathbf{i}_A(t)$ . 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

$\mathbf{F}_s^h(t, \theta)$  et celle  $\mathbf{F}_{s, \text{maille.cc}}^n(t, \theta)$  de la maille supplémentaire court-circuitée [SHR10]

$$\mathbf{F}_{s, \text{cc}}^h(t, \theta) = \mathbf{F}_s^h(t, \theta) - \mathbf{F}_{s, \text{maille.cc}}^n(t, \theta) \quad (\text{II.6})$$

Avec:

$$\mathbf{F}_{s, \text{maille.cc}}^n(t, \theta) = N_{e, \text{maille.cc}}(\theta) \times \mathbf{I}_{cc}(t) \quad (\text{II.7})$$

$$\mathbf{F}_s^h(t, \theta) = \hat{\mathbf{F}}_{s, h}^n \sin(wst \pm hp\theta) \quad (\text{II.8})$$

Où  $N_{s, \text{maille.cc}}(\theta)$  est la fonction d'enroulement de la maille supplémentaire court-

Circuit. Pour un moteur à  $p$  paires de pôles, cette fonction peut être calculée facilement, comme suivent :

$$N_{s.maillage.cc}(\theta) = \sum_{\mathbf{n} = \mathbf{1} \frac{2w_{s.cc}}{n\pi}} \sin(n \frac{\pi}{2}) \cos(np\theta) \quad (\text{II.9})$$

Avec  $\mathbf{n} = 2\mathbf{k}+1$  le rang des harmoniques dû à la distribution spatiale des spires court-circuités dans les encoches statorique.

Par conséquent, et selon les équations (II.5), (II.7) et (II.9), on obtient l'expression du terme général de la FMM générée par les spires court-circuitées :

$$F_{s.maillage.cc}^n(t, \theta) = \frac{2w_{s.cc}I_{CC}}{n\pi} \sin(n \frac{\pi}{2}) \cos(np\theta) \sin(wst) \quad (\text{II.10})$$

L'équation (II.9) 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 :

$$F_{s.maillage.cc}^n(t, \theta) = \widehat{F}_{s.maillage.cc}^n \left[ \underbrace{\cos(ws - np\theta)}_{\text{Direct}} + \underbrace{\cos(ws + np\theta)}_{\text{Inverse}} \right] \quad (\text{II.11})$$

Finalement, et selon les équations (II.8), (II.6) et (II.11), 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]:

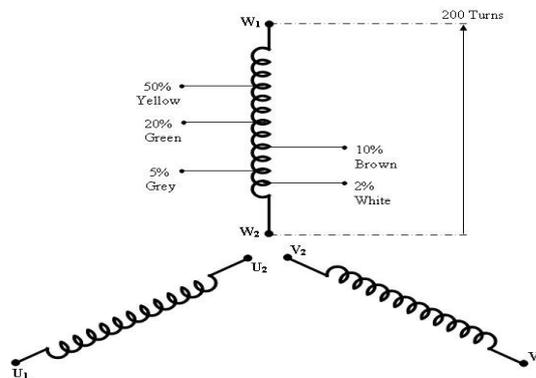
$$F_{s.cc}^{hn}(t, \theta) = \widehat{F}_{sh} \sin(wst \pm hp\theta) - \widehat{F}_{s.maillage.cc}^n \cos(wst \pm np\theta) \quad (\text{II.12})$$

L'équation (II.12) montre clairement que le défaut de court-circuit entre spires statoriques engendre seulement des champs statoriques additionnels: direct et inverse, possédant la même fréquence  $fs$  du fondamental. Donc, il n'y a aucune nouvelle composante fréquentielle dans le champ statorique et par conséquent, il n'y aura pas des nouveaux courants induits dans les enroulements statoriques. Cela signifie que le défaut de court-circuit entre spires statoriques n'a pas de signatures fréquentielles propres dans le spectre du courant statorique; mais, il fait seulement modifier les amplitudes des différents harmoniques qui existaient déjà dans le spectre du courant à l'état sain. Il faut bien noter ici que le spectre du courant à l'état sain est riche en harmoniques tels que les harmoniques du temps (TH), les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH) et même les harmoniques : RBFH et EFH créés par l'asymétrie résiduelle

du moteur. Par conséquent, tous ces harmoniques seront aussi affectés par le défaut de court-circuit [SHR10].

### II.5. Résultats.

Le même band d'essai est utilisé pour étudier expérimentalement le défaut de court circuit. Pour simuler des courts-circuits réels, une machine de 3kW a été spécialement rebobinée afin de rajouter des prises supplémentaires. Cinq bornes intermédiaires au niveau de la phase W1-W2 ont été sorties dans différents points. Ces sorties ont alors été reliées à une plaque à bornes pour pouvoir simuler des courts-circuits d'un nombre donné de spires (Figure II.5).

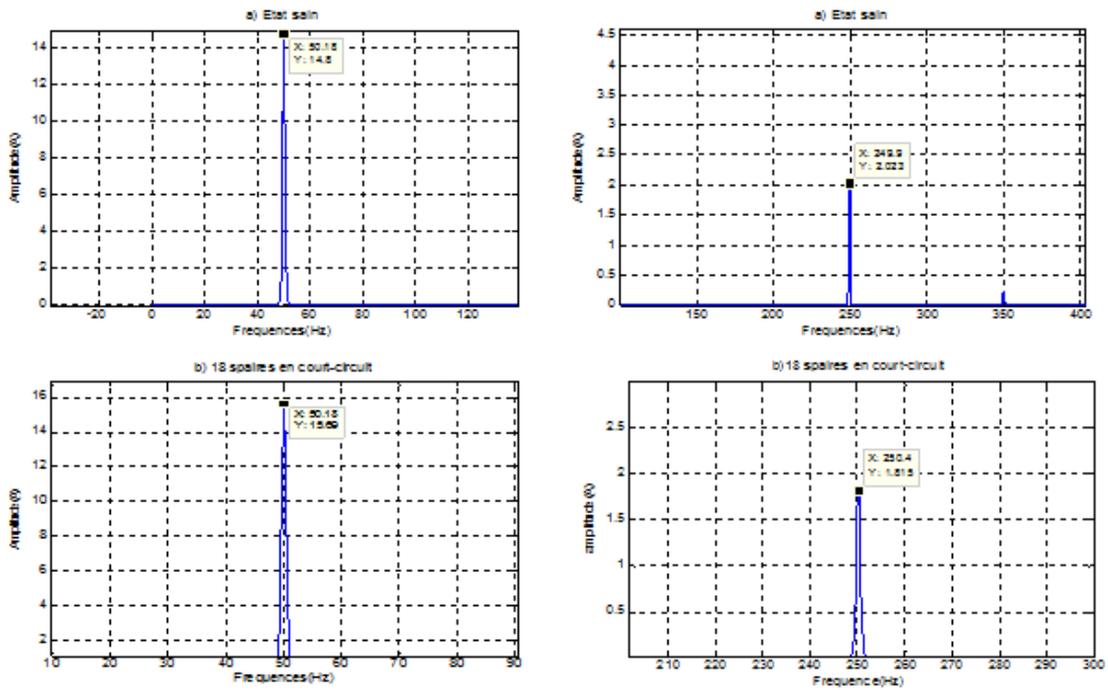


**Fig. II.5 :** Schémas simplifié montrant les prises réalisées pour faire des courts-circuits entre différents nombres de spires de l'enroulement W1-W2

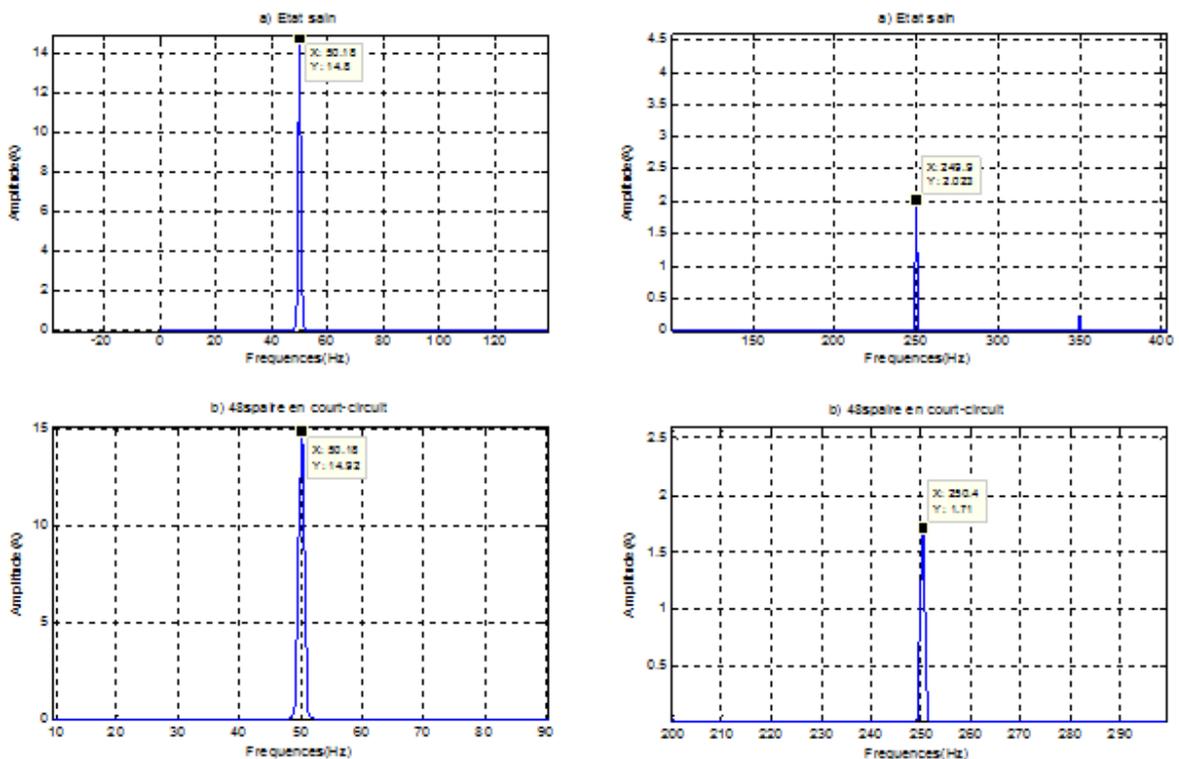
De l'extérieur, il est donc très simple d'introduire le défaut de court-circuit et de mesurer aussi le courant de court-circuit. Cependant, en raison de l'amplitude de ce courant, il est important de signaler que la durée du court-circuit ne doit pas dépasser 2.5 secondes afin d'élargir au maximum la durée de vie du notre moteur. Plusieurs essais ont été effectués pour différents régimes de fonctionnement (mi-charge et pleine charge) à l'état sain et avec 18 puis 48 spires en court-circuit. Pour chaque essai, on a enregistré les trois courants d'alimentation. Les figures (II. 6, 7, 8, 9) montrent les spectres du courant statorique du moteur 3kW en mi-charge pendant l'état sain puis avec 18 et 48 spires en court-circuit. Il est clairement visible que la plupart des harmoniques du courant statorique augmentent en amplitude à cause de la présence d'un défaut de court-circuit entre spires, cette augmentation dépend de la sévérité du défaut. On remarque aussi que les RSH et les TH sont les plus sensibles à la présence de ce

défaut. Cependant, on observe que certains harmoniques ne subissent pas à cette loi, tels que ceux de fréquences,  $(3fs-Nr*fr)$ ,  $(5fs-Nr*fr)$ ,  $(5fs)$ , et  $(19fs)$  qui, au contraire diminuent en présence de court-circuit entre spires. De plus, ces figures montre que le défaut de court-circuit provoque des augmentations importantes sur les amplitudes des harmoniques de type RBFH surtout les composantes de fréquence  $(1 \pm 2s)fs$  qui sont théoriquement les signatures des cassures de barres. Ces résultats mettent en évidence notre constat qui dit que le défaut de court-circuit entre spires statorique n'a pas de signatures propres mais il fait seulement changer les amplitudes des différentes composantes spectrales qui existaient déjà dans le spectre du courant statorique.

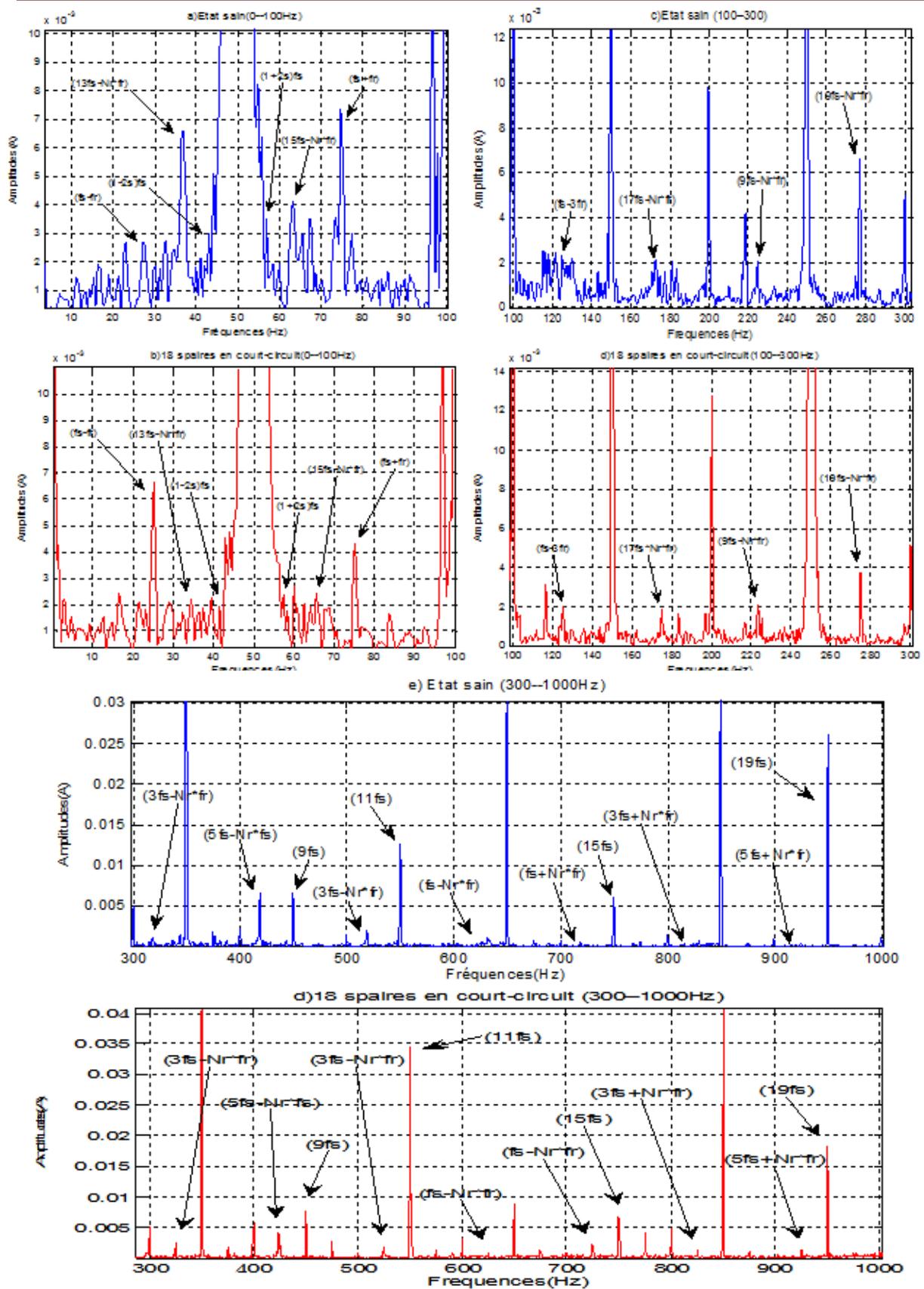
- les paramètres d'acquisition utilisés lors des essais expérimentaux sont les suivants :
  - La fréquence d'échantillonnage :  $Fe = 12800 \text{ Hz}$
  - Le nombre des échantillons :  $Ne = 25000 \text{ échantillons}$
  - Le temps d'acquisition :  $Ta = Ne / Fe = 1.9531 \text{ sec}$
  - La résolution fréquentielle:  $df = 1 / Ta = 1 / 1.9531 = 0.5120 \text{ Hz}$



**Fig. II.6 :** Spectre linéaire du courant  $i_A$  à l'état sain et avec 18 spires en court-circuit en mi charge, moteur 3kW (visualisation des premiers harmoniques du temps)



**Fig. II.7 :** Spectre linéaire du courant  $i_A$  à l'état sain et avec 48 spires en court-circuit en mi charge, moteur 3kW (visualisation des premiers harmoniques du temps)



**Fig. II.8 :** Spectre linéaire du courant  $i_A$  à l'état sain et avec 18 spaires en court-circuit en mi charge, moteur 3kW (visualisation des TH, RSH, RBFH et EFH)

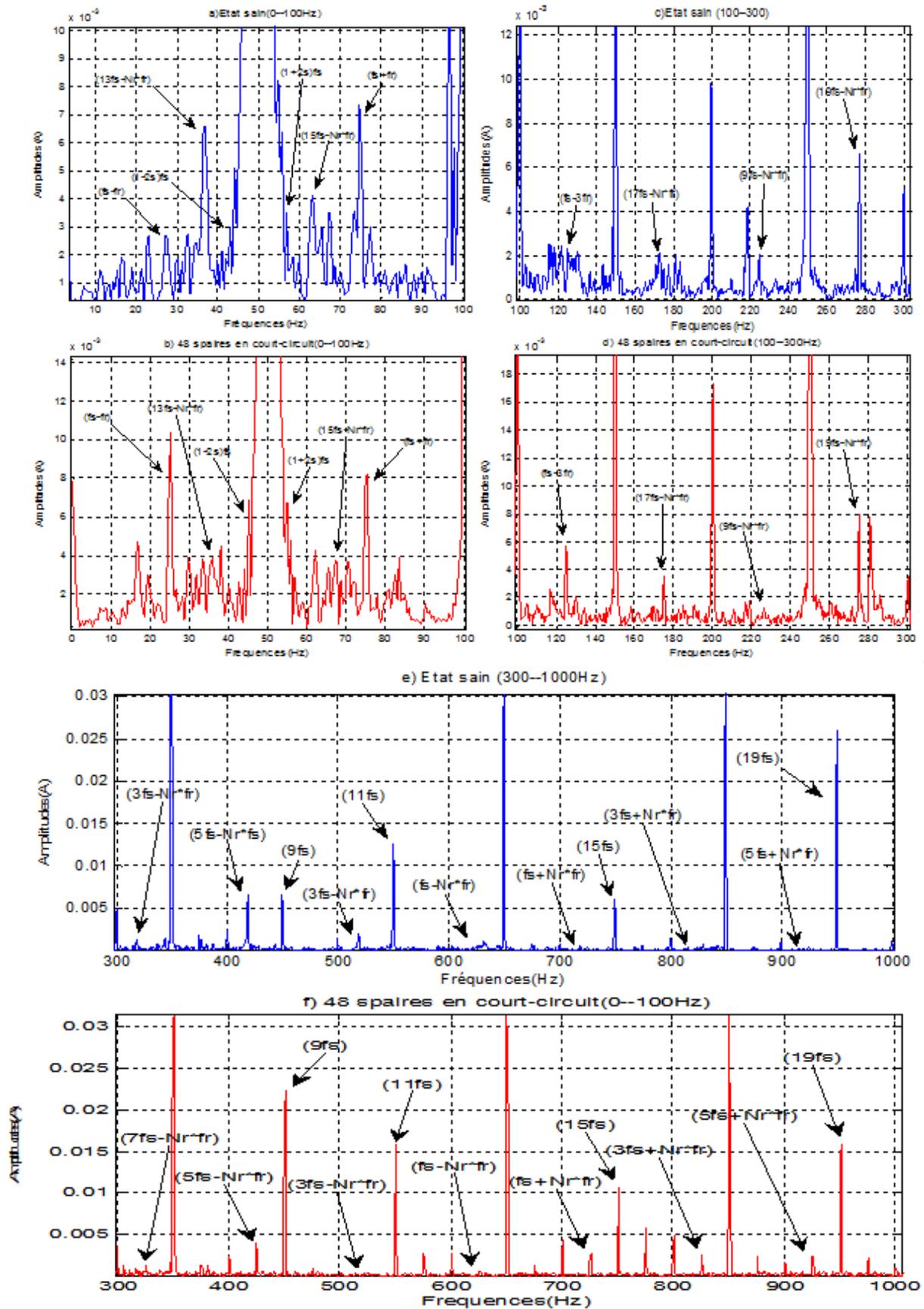


Fig. II.9 : Spectre linéaire du courant  $i_A$  à l'état sain et avec 48 spaires en court-circuit  
En mi charge, moteur 3kW (visualisation des TH, RSH, RBFH et EFH)

## II.6. 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 qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique même à l'état sain fait par un courant réel d'une phase d'un moteur asynchrone à 100% de la charge nominale par la méthode de FFT et nous avons vu une étude sur spectre du courant statorique avec défaut de court circuit entre spires par l'application 'FFT' ( Fast Fourier Transform) ceci pour savoir le type d'harmonique qu'il faut choisir pour la détection de défaut de court circuit entre spires statorique malheureusement. On a remarqué que le défaut de court-circuit entre spires statoriques n'a pas des signatures fréquentielles propres dans le spectre du courant statorique pour sa on a proposé l'utilisation des indicateur de défauts, et l'application de cette sera l'objet du chapitre suivant.

# *Chapitre III*

## *Détection défaut*

*De*

*Court circuit entre*

*Spires par la méthode*

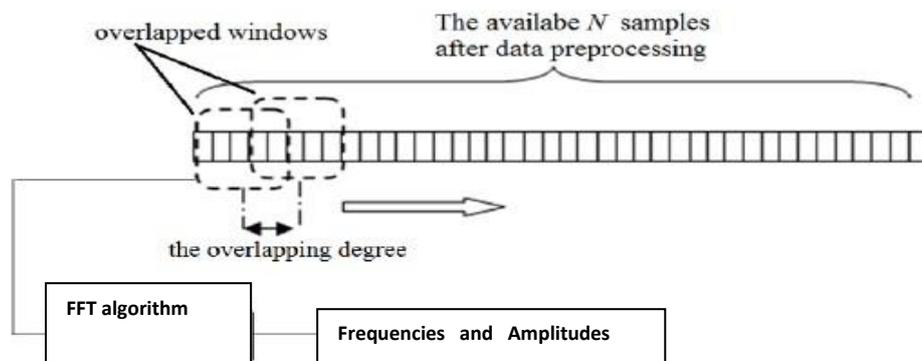
*De FFTFG*

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons passer à l'application de l'algorithme proposé sur des signaux réels issus d'un band d'essai expérimental pour détecter le défaut de court-circuit entre spires statoriques. Le but est la détection de la présence d'un défaut court circuit entre spires statorique par la méthode de FFTFG en utilisant des indicateurs extraites à partir de l'analyse des impédances statoriques. L'idée consiste à estimer les impédances puis les composantes symétriques. L'étude de la robustesse des indicateurs définis face aux variations de certaines conditions de fonctionnement sera aussi présentée.

### III.2. Algorithme de FFT à fenêtre glissante (FFTFG)

Cette méthode consiste à subdiviser le signal en plusieurs fenêtres de petites tailles, et chaque fenêtre sera analysée par la méthode de FFT. Le principe de cette méthode est présenté dans la figure III.1. Le choix de la taille de la fenêtre est une tâche critique. En effet, l'augmentation de la taille de la fenêtre améliore la précision des résultats d'une part mais d'une autre part, elle augmente le temps de calcul. On doit donc trouver un compromis entre la rapidité et la précision. De plus, le pas de déplacement de la fenêtre a une grande influence sur la résolution temporelle. En fait, un pas très petit, permet de suivre les variations brusques qui peuvent se manifester lors de l'acquisition du signal.



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

### III.3. 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. [AZO17]

#### III.3.1. Système direct

Le système direct est un système triphasé équilibré de séquence directe (abc), comme a la figure III.2

$$\xrightarrow{\text{system direct}} \begin{bmatrix} v_{da} \\ v_{db} \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ a^2 v_d \\ a v_d \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

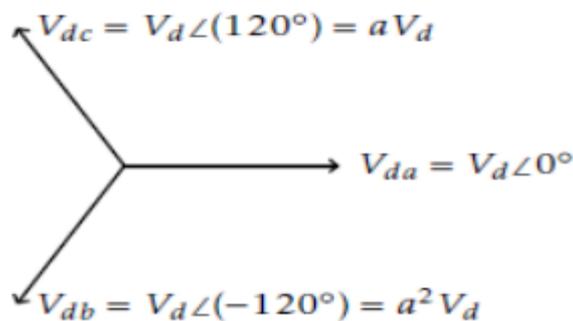


Fig. III.2 : Séquence directe

#### III.3.2. Système inverse

Le système inverse est un système triphasé équilibré de séquence inverse (acb), comme a la figure III.3 [AZO17]

$$\xrightarrow{\text{system inverse}} \begin{bmatrix} v_{ia} \\ v_{ib} \\ v_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \\ a v_i \\ a^2 v_i \end{bmatrix} \cdot \quad (\text{III.2})$$

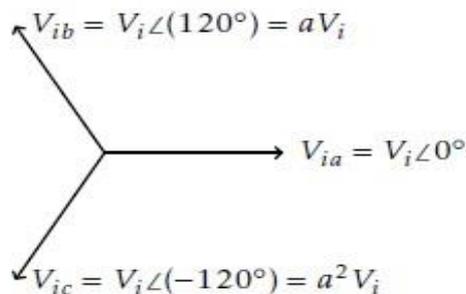


Fig. III.3 : Séquence inverse

Avec :

$$\alpha = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \times j$$

$$\alpha^2 = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \times j$$

### III.3.3. Système homopolaire

Le système homopolaire est un système triphasé où les tensions sont égales, ceci est présenté sur la figure III.4 [AZO17]

$$\xrightarrow{\text{system homopolaire}} \begin{bmatrix} v_{oa} \\ v_{ob} \\ v_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_o \quad (\text{III.3})$$

Dans ce cas,  $V_{oa} = V_{ob} = V_{oc} = V_o$ .

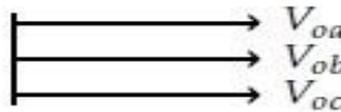


Fig. III.4 : Séquence homopolaire

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

$$\text{Soit } \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \text{ un système triphasé déséquilibré } \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} v_d + \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} v_i + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} v_o \quad (\text{III.4})$$

On peut simplifier la représentation du système :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} v_d \\ v_i \\ v_o \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Le calcul des tensions des systèmes se fait à l'aide de la matrice  $M$  inverse :

$$M^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} v_d \\ v_i \\ v_o \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

### III.4. Les composantes symétriques des impédances

Soit un système triphasé déséquilibré avec des impédances  $\begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix}$  : [AZO17]

On obtient les relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} Z_d \\ Z_i \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{bmatrix} Z_d \\ Z_i \\ Z_o \end{bmatrix} = [M^{-1}] \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Remarque : Dans une charge triphasée équilibrée,  $Z_a = Z_b = Z_c = Z$ , et alors

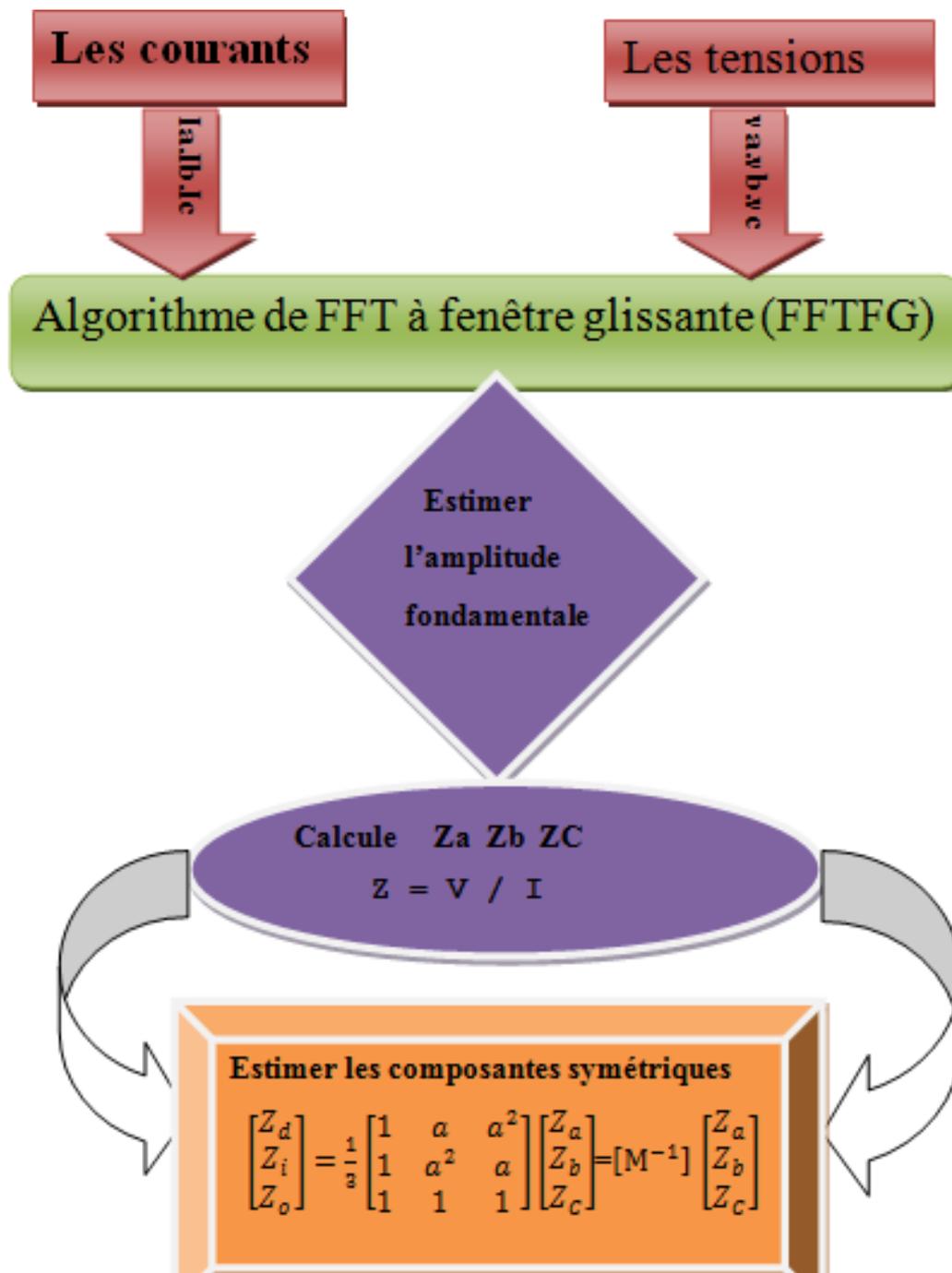
$$Z_d = \frac{1}{3} (1 + a + a^2) Z = 0$$

$$Z_i = \frac{1}{3} (1 + a^2 + a) Z = 0$$

$$Z_o = \frac{1}{3} (1 + 1 + 1) Z = 0$$

### III.5. Détection défaut de court-circuit entre spires par méthode FFTFG

Pour détecter le défaut du court-circuit, nous allons introduire en premier les signaux des courants et des tensions dans notre algorithme FFTFG qui va estimer les amplitudes, et précisément les amplitudes fondamentales, et à partir de ces derniers on applique la loi d'Ohm ( $Z = V / I$ ) et on calcule les impédances ( $Z_a, Z_b, Z_c$ ). Les impédances obtenues seront utilisées pour calculer les composantes symétriques ( $Z_d, Z_i, Z_o$ ) en utilisant l'équation (III.8)



**Fig. III.5 :** Détection défaut de court-circuit entre spires par méthode FFTFG

### III.6. Application sur le moteur

Les signaux des courants et des tensions ont été échantillonné à la fréquence de 12.8 kHz pendant 10 s. ce qui permet d'obtenir 128000 échantillons. On utilise une fenêtre glissante de  $N_e = 25000$  échantillon.

### III.7. L'étude expérimentale

L'étude comme suivante :

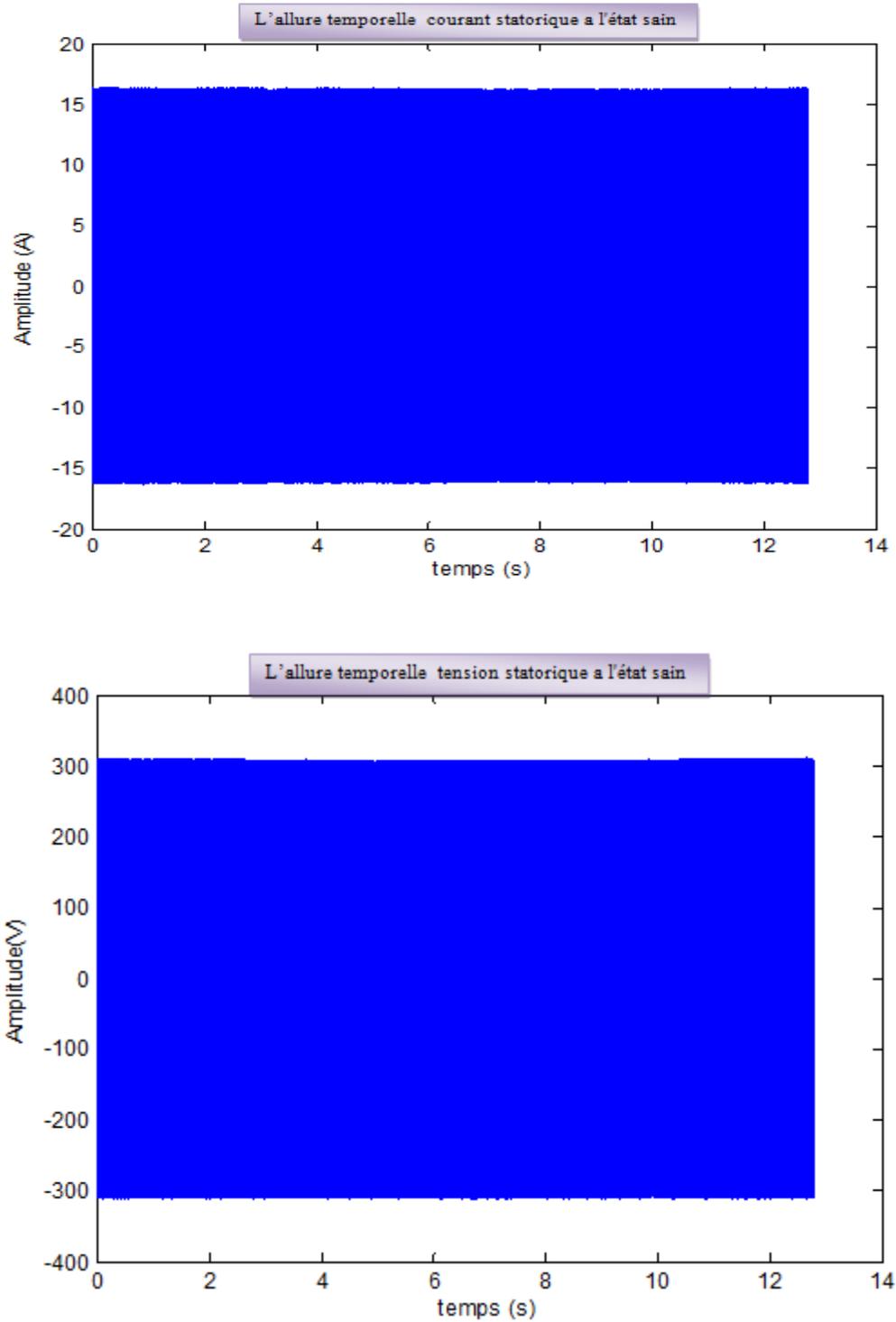
Premier cas l'état sain **Fig. III.7, III.8, III.9, III.10, III.11** en va estimer la fréquence, les courants, les tensions et indicateur de détection de défaut (les trois impédances et composante symétrique direct et inverse et homopolaire des impédances).

Deuxième cas la présence de défaut de court-circuit entre spires statorique **Fig. III.13, III.14, III.15, III.16**, on va faire estimer les courants et tensions de trois phase et l'effet de défaut de court-circuit entre spires statorique sur l'indicateur de défaut (les trois impédances et composante symétrique direct et inverse et homopolaire des impédances).

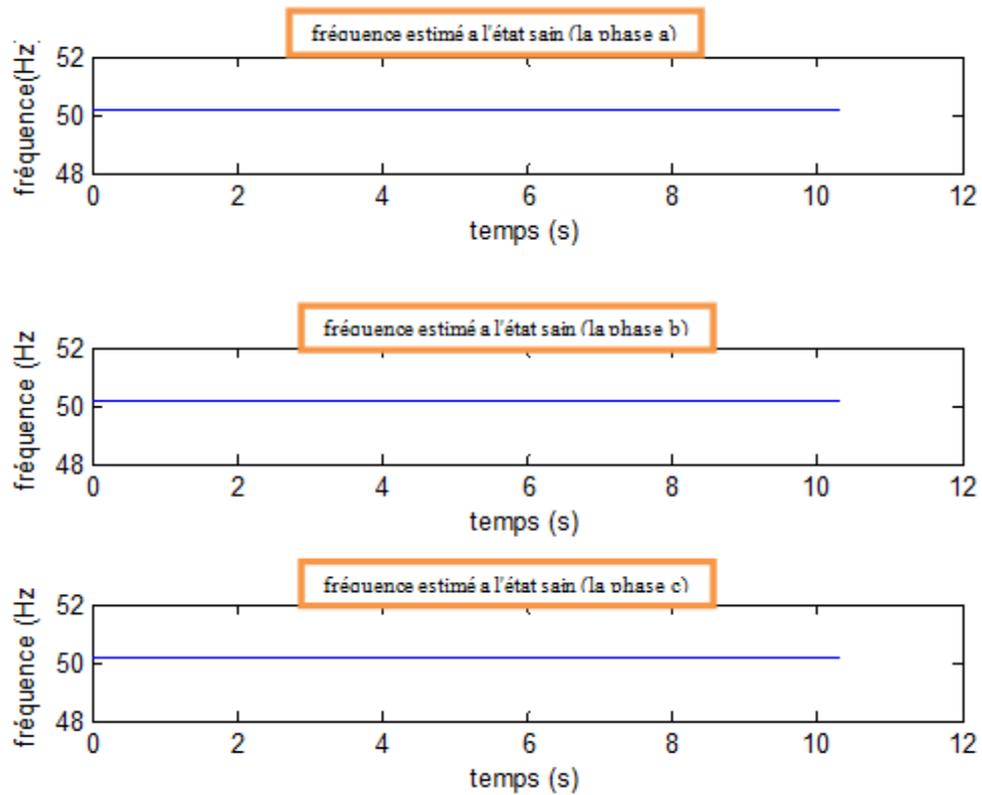
Troisième cas l'état de variation de la charge **Fig. III.18, III.19, III.20** on va estimer les courants, et l'effet de la charge sur l'indicateur de défaut (les trois impédances et composante symétrique direct et inverse et homopolaire des impédances).

Quatrième cas la présence de défaut de déséquilibre dans la source de tension **Fig. III.22, III.23, III.24, III.25** en va estimer les courants, les tensions, les impédances et l'effet de défaut sur l'indicateur (les trois impédances et composante symétrique direct et inverse et homopolaire des impédances).

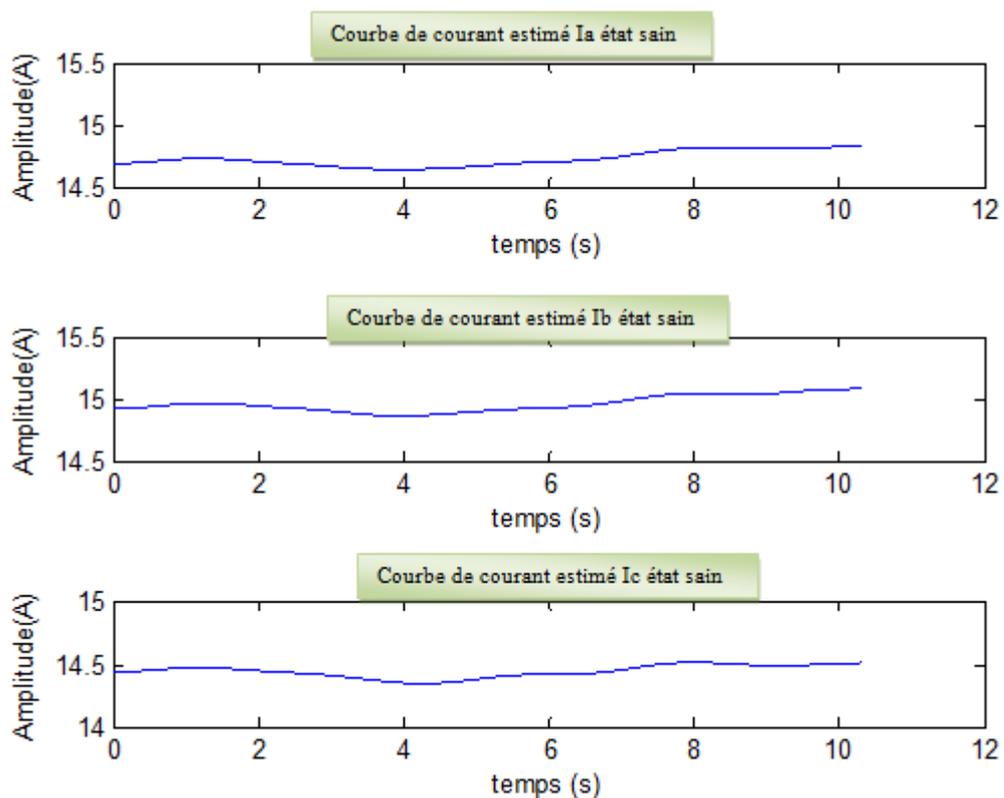
**III.7.1. Étude du moteur à l'état sain :** dans cette partie, on va étudier les performances de l'algorithme proposé quant à l'estimation des amplitudes et fréquences des harmoniques cibles ainsi que les différentes impédances.



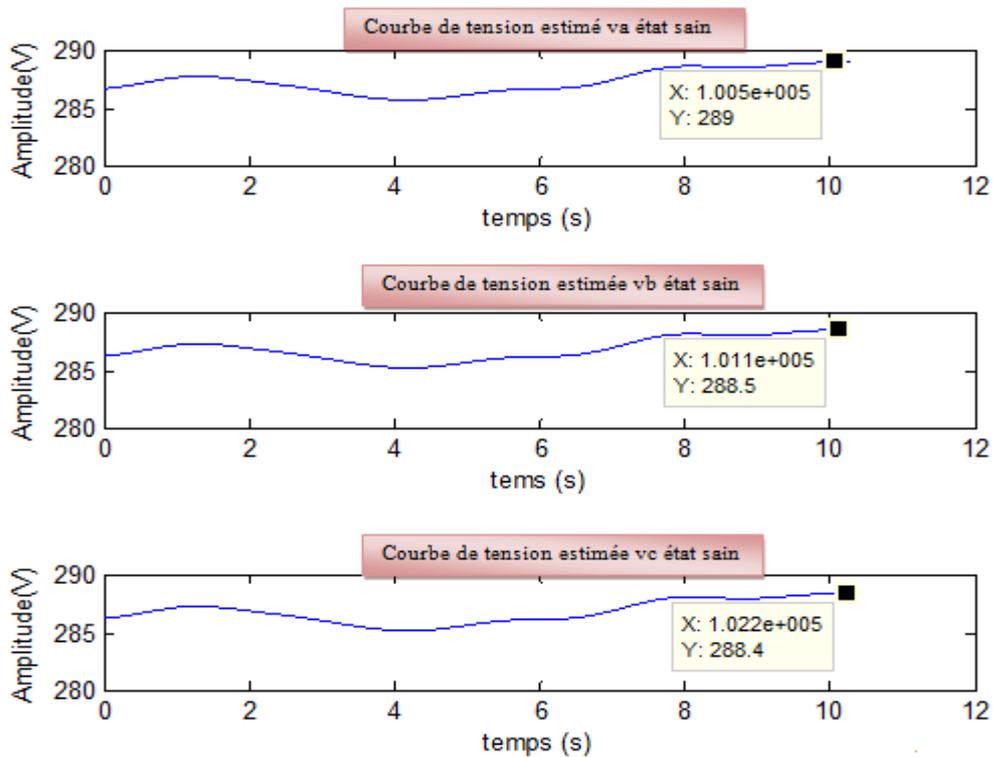
**Fig. III.6:** L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état sain



**Fig. III.7:** Fréquence estimée du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état sain.

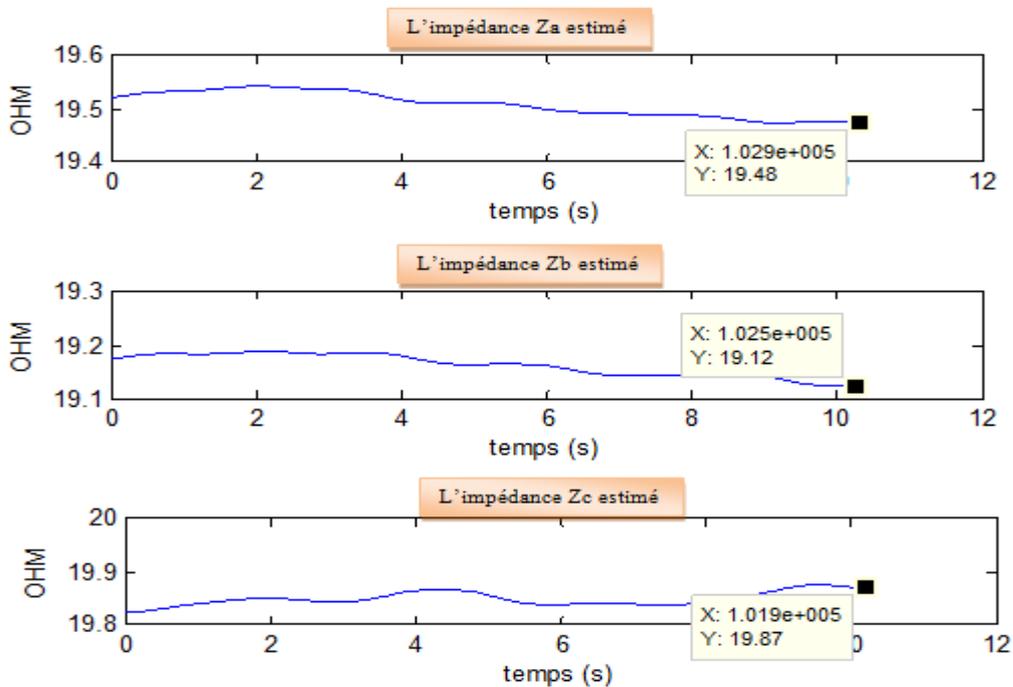


**Fig. III.8 :** l'amplitude estimée de la composante fondamentale du courant à l'état sain.

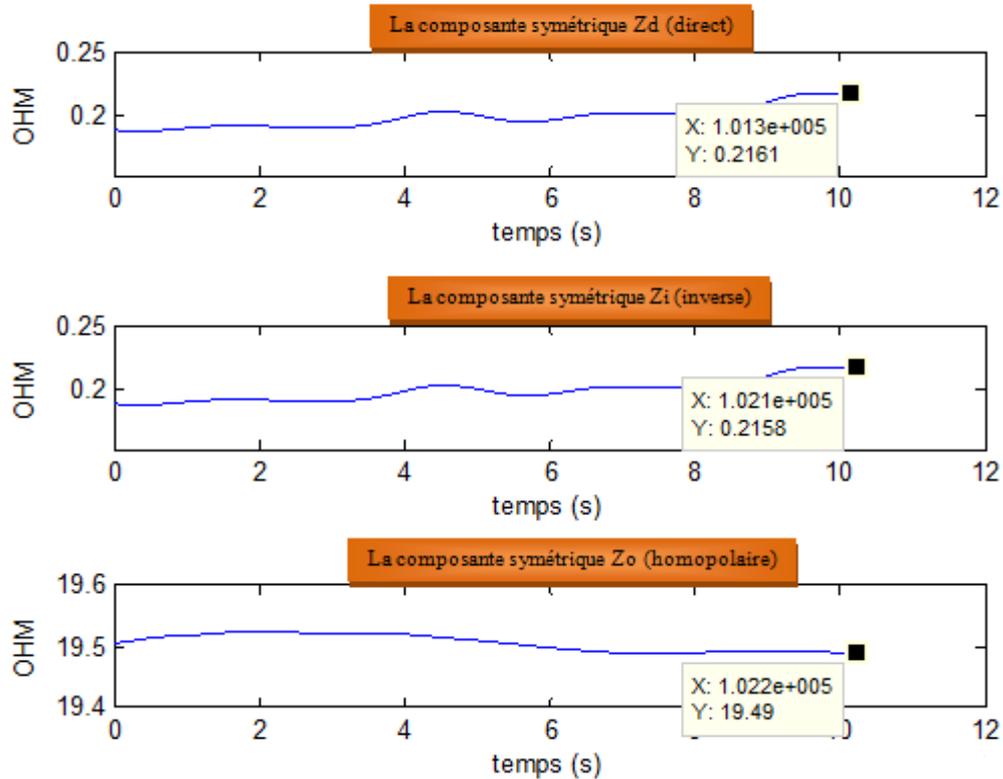


**Fig. III.9 :** l'amplitude estimée de la composante fondamentale de la tension à l'état sain.

✓ On remarque que les tensions et les courants des trois phases n'ont pas les mêmes valeurs



**Fig. III.10 :** les impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état sain



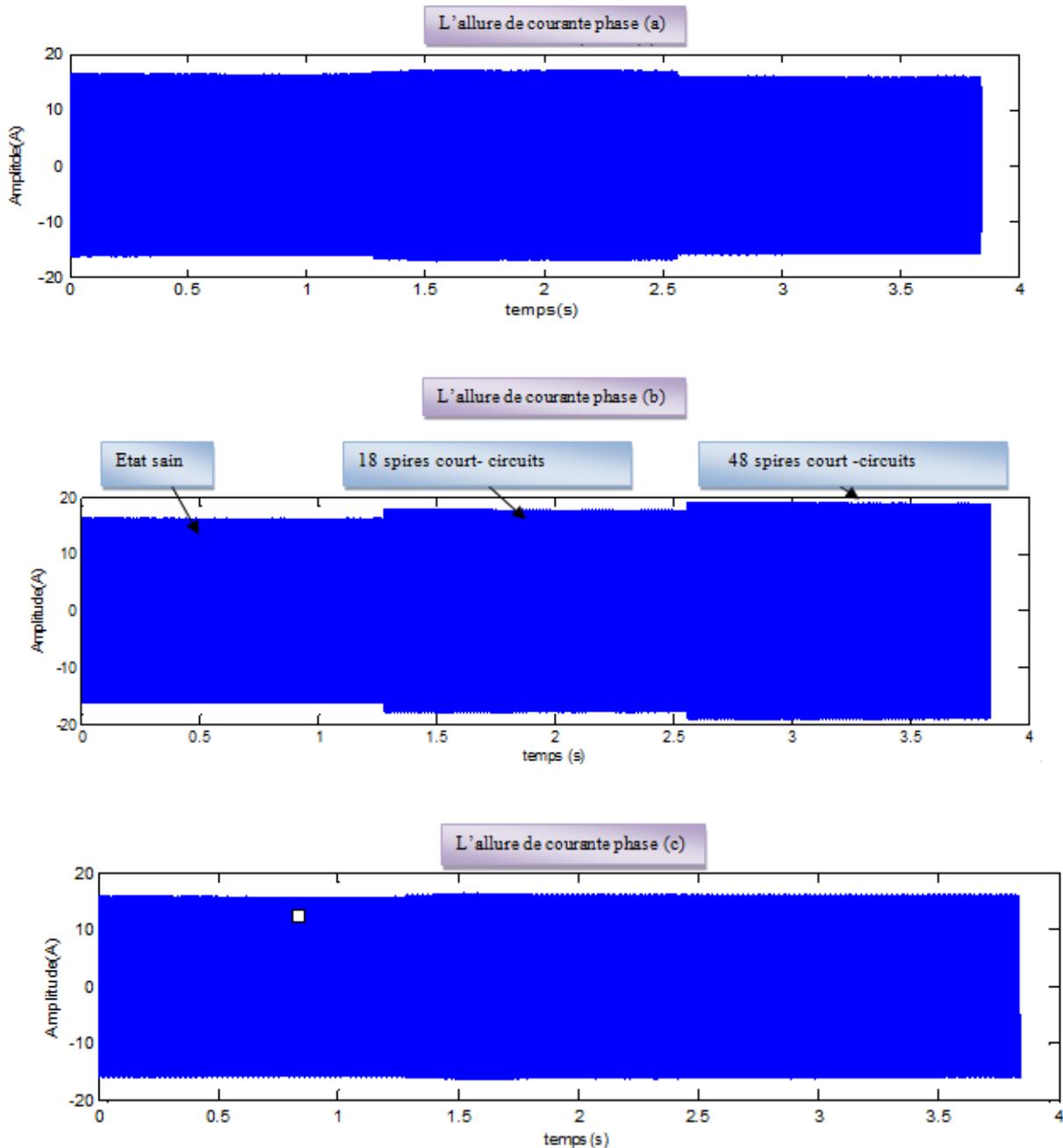
**Fig. III.11** : Les composantes symétriques estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état sain.

Selon les figures (III.8, III.9), on peut constater qu'il existe un certain déséquilibre naturel dans le moteur. Ce déséquilibre peut être au niveau des tensions d'alimentation (imposé par le réseau) ou au niveau de bobinage statorique (problème de fabrication).

Selon la figure III.11, on remarque que les composantes symétriques ( $Z_i$ ,  $Z_d$ ) prennent des valeurs très petites pendant le fonctionnement sain. Ces valeurs ne sont pas constantes par ce que le moteur n'est pas parfaitement équilibré.

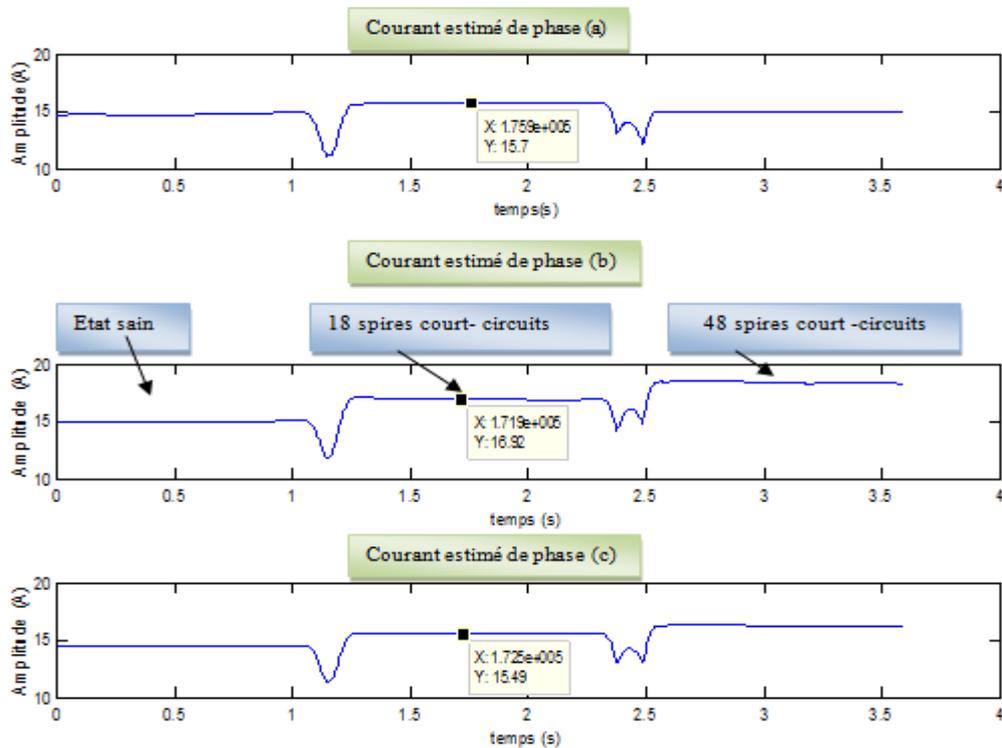
### III.7.2. Étude du moteur en présence de défaut de court-circuit entre spires statoriques

Dans cette partie, nous allons tester les performances de l'algorithme proposé pour l'estimation des indicateurs de défauts correspondant à un moteur fonctionnant en présence d'un défaut de court-circuit entre spires.

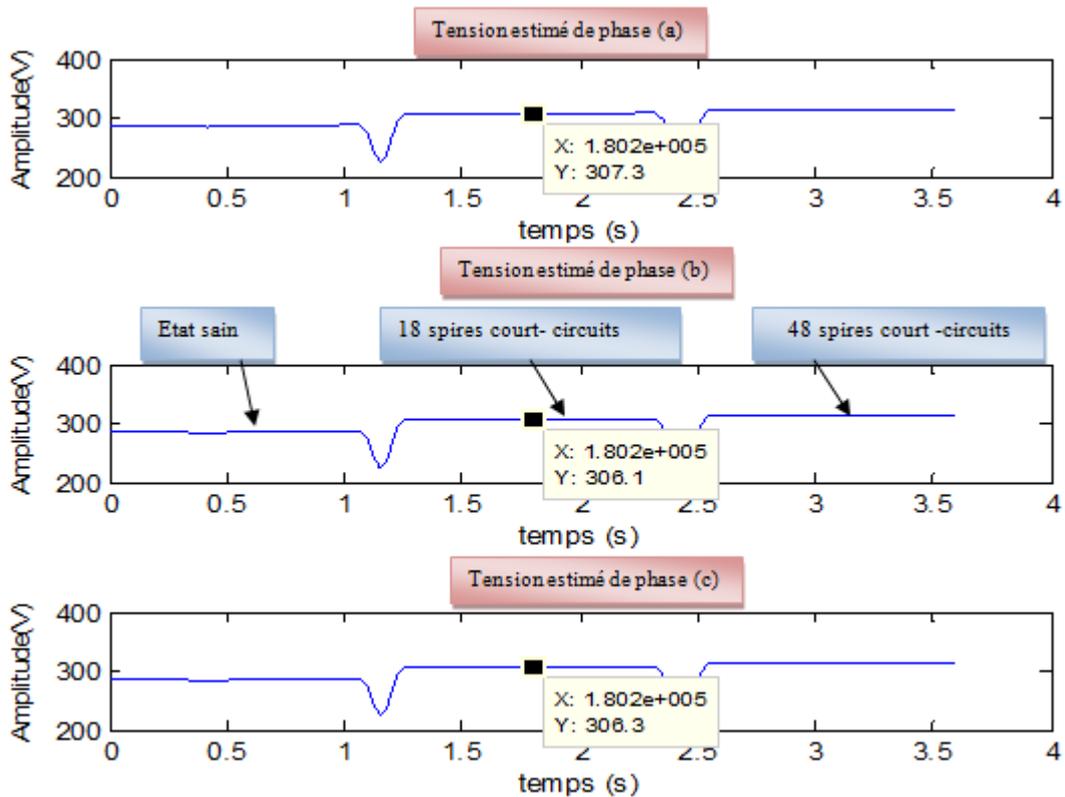


**Fig.III.12** : L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état  
Défaut de court circuit entre spires statorique.

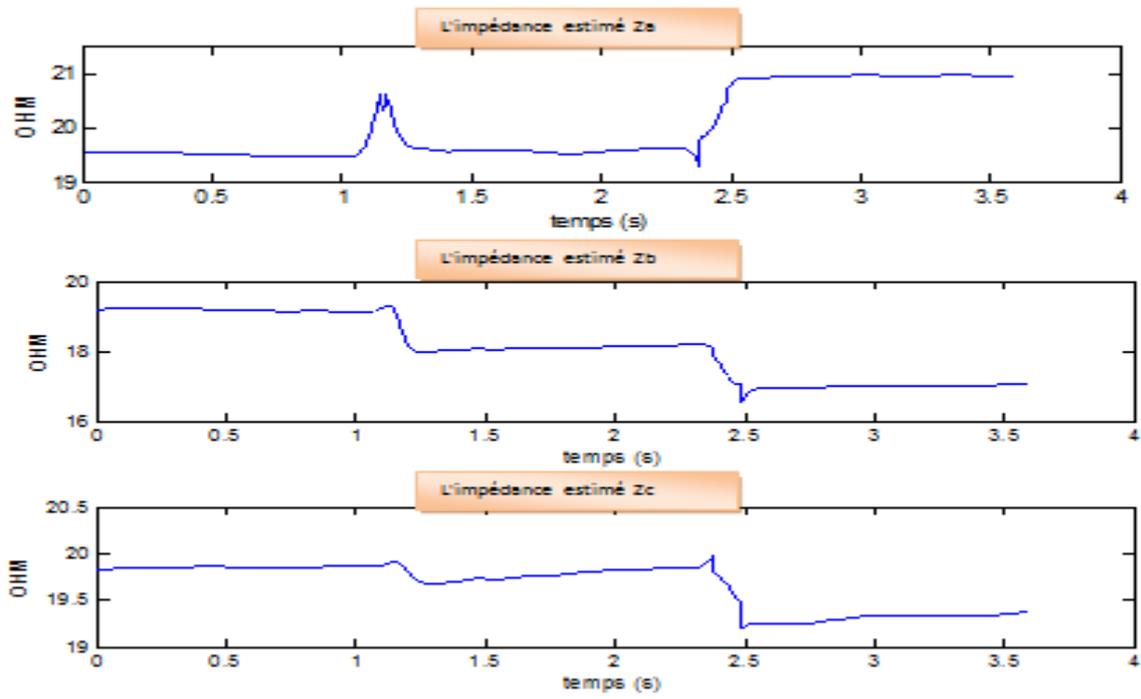
- ✓ A partir de cette figure nous ne concluons que le défaut de court-circuit entre spires existants dans la phase **b**



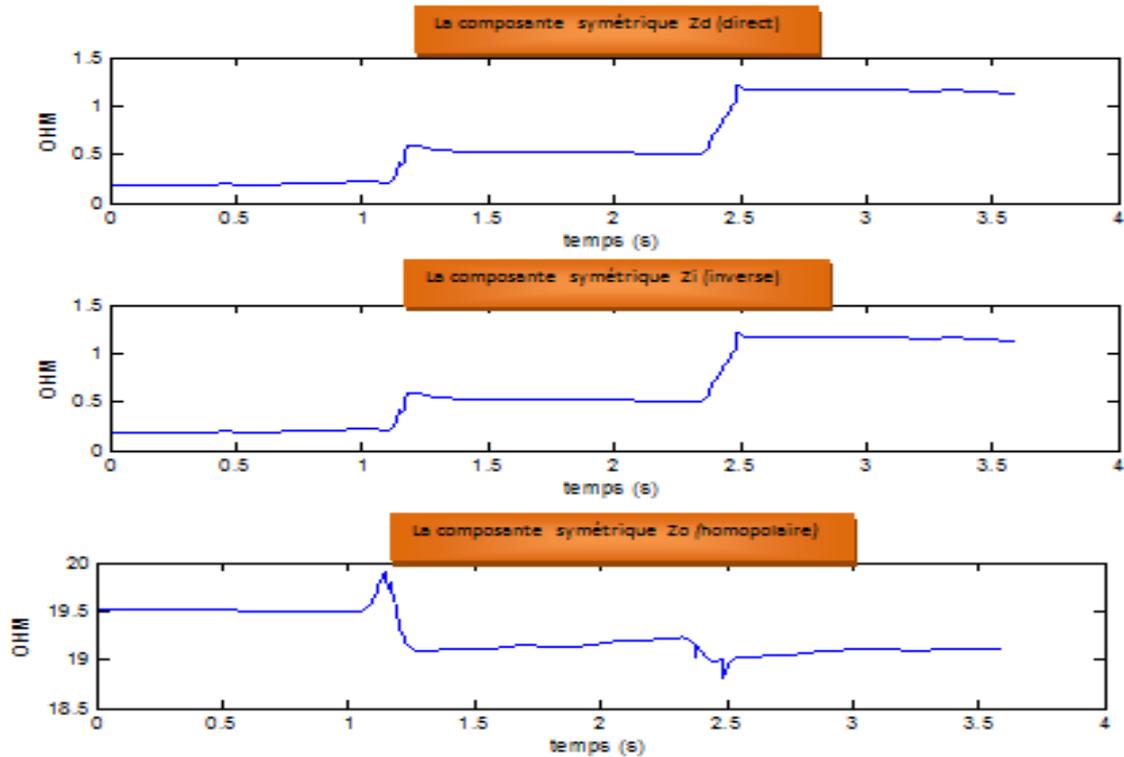
**Fig. III.13** : les courants estimés du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état Défaut de court circuit entre spires statorique.



**Fig. III.14** : les Tension estimés du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état Défaut de court circuit entre spires statorique.



**Fig. III.15:** les impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état défaut de court circuit entre spires statorique.



**Fig. III.16:** Les composantes symétriques directe, inverse et homopolaire des Impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone à l'état défaut de court circuit entre spires statorique.

Les figures (III.13, 14) montrent une augmentation dans les courants et les tensions des trois phases (abc) statoriques suite à un court-circuit entre 18 et 48 spires. Nous remarquons que le courant de phase en défaut phase (b) de moteur prend la plus grande valeur de courant, avec une augmentation des courants et tensions dans les deux autres phases qui sont due au couplage magnétique des trois phases statoriques.

Selon la figure (III.15), on remarque il ya un déséquilibre naturelle dans les impédances dans l'instant  $t=[0s \ 1.1s]$  et à l'intervalle de temps  $t=[1.2s, 3.6s]$  à cause de la présence de défaut de court circuit entre spires statoriques de (18 et 48 spires en court circuit). Dans le premier essai (18 spires en court-circuit), on observe une légère augmentation dans l'impédance de la phase (a) et une diminution dans l'amplitude de l'impédance dans la phase en défaut (b), et aussi la phase de défaut (c). Dans la deuxième essai (48 spires en court circuit), on remarque une augmentation dans l'impédance da la phase (a) et diminution de l'amplitude de l'impédance dans la phase en défaut (b) et aussi l'impédance de la phase (c).

Selon la figure (III.16), on remarque que les composantes symétriques des impédances estimées (directe et inverse) augmentent proportionnellement en fonction de la sévérité de défaut. Par contre, on peut remarquer clairement une diminution dans la composante symétrique homopolaire.

**Remarque :** les figures précédentes montrent que les allures estimées des courants et les tensions satatoriques ne donnent pas une information claire sur la présence du défaut de court-circuit. Par contre, les impédances et les composantes symétriques des impédances offrent des informations très claires sur ce défaut, ce qui nous permet de les considérées comme des bons indicateurs de défaut de court-circuit à ce stade.

### III.7.3. Test de la robustesse de la technique proposée

Maintenant, nous allons tester la robustesse de la technique proposée vis-à-vis deux contraintes :

- ✓ Diminution brusque de la charge.
- ✓ Présence d'un déséquilibre dans les tensions d'alimentation.

Pour vérifier l'efficacité de la méthode proposée, on doit suivre l'évolution des différents indicateurs pendant les contraintes définies ci-dessus puis, on les compare avec le cas de défauts de court-circuit.

#### III.7.3.1. Effet de la diminution brusque de la charge sur les indicateurs de défaut de cc

Les essais expérimentaux ont été effectués au sein du Laboratoire de modélisation du système énergétique (LMSE). Le moteur asynchrone triphasé à cage utilisé dans nos expérimentations est un moteur de 3 kW. Le stator est constitué de 48 encoches alors que le rotor se compose de 28 barres en Aluminium.

Dans un premier temps, on a effectué trois essais où le moteur a été couplé en étoile sans neutre et fonctionnait à 100% de la charge, à 60% de la charge et à 20% de la charge.

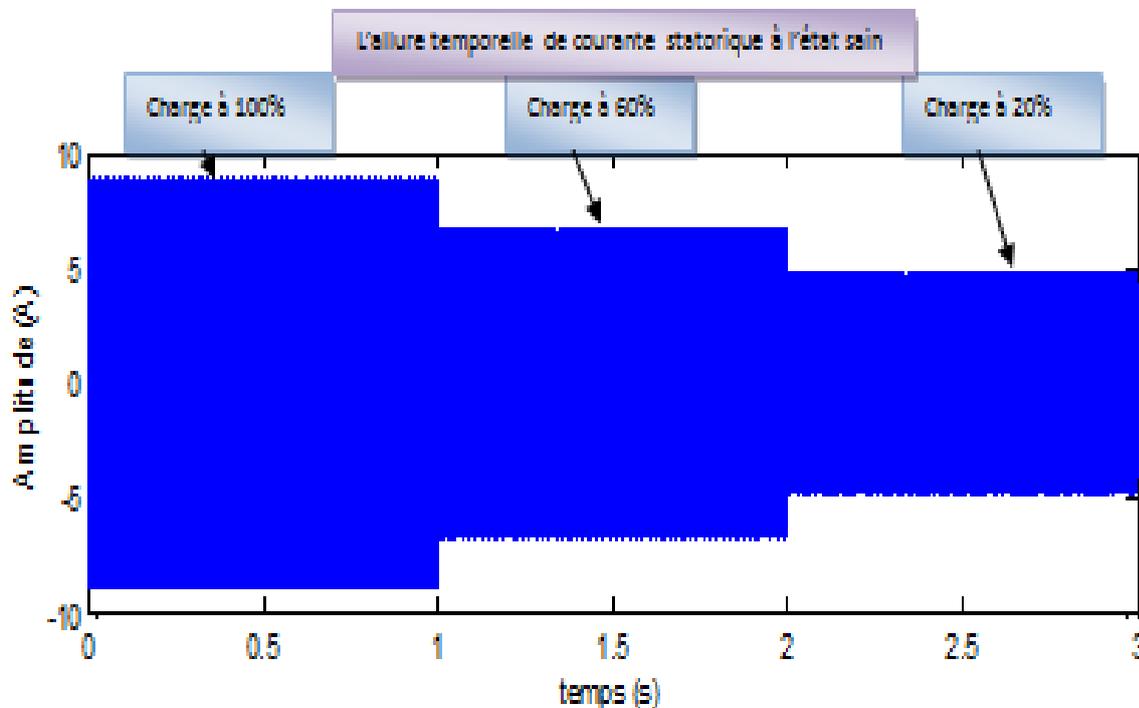


Fig. III.17 : L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état de différent charge.

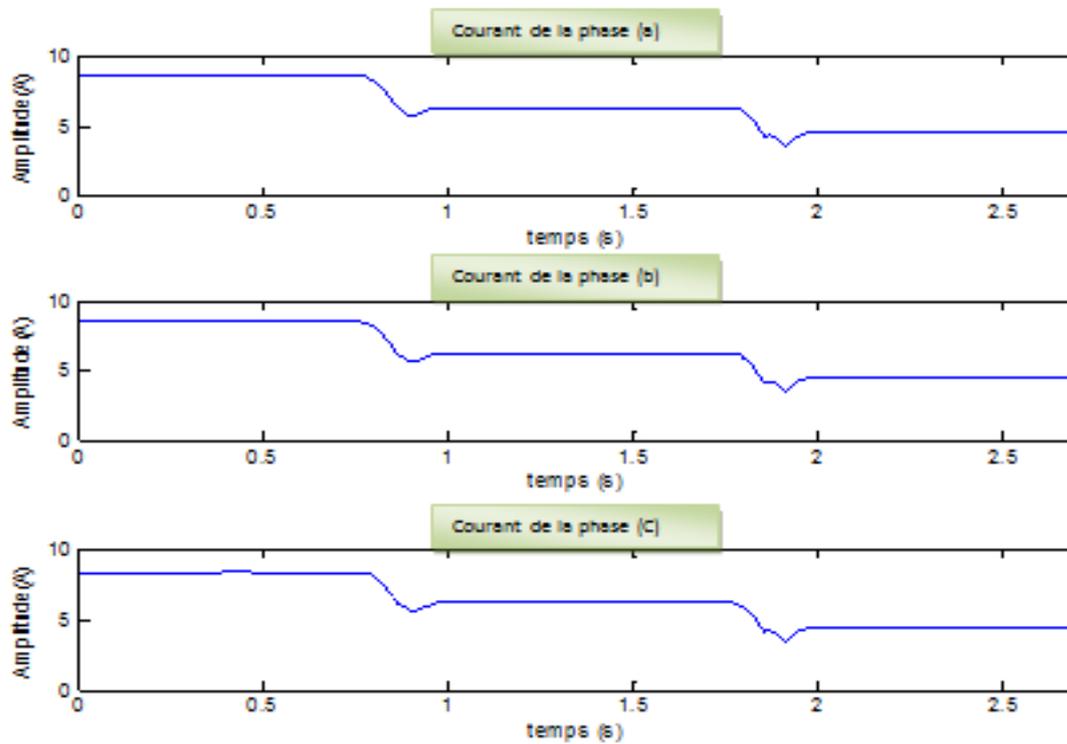


Fig. III.18: les courants estimés du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état de variation de la charge.

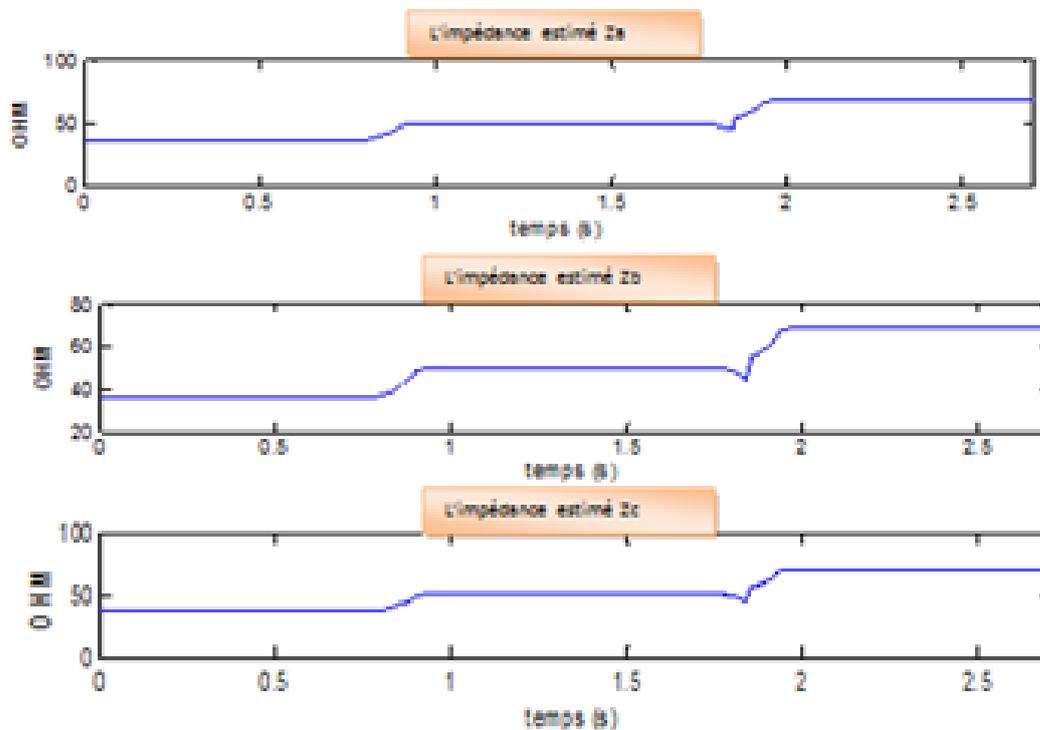
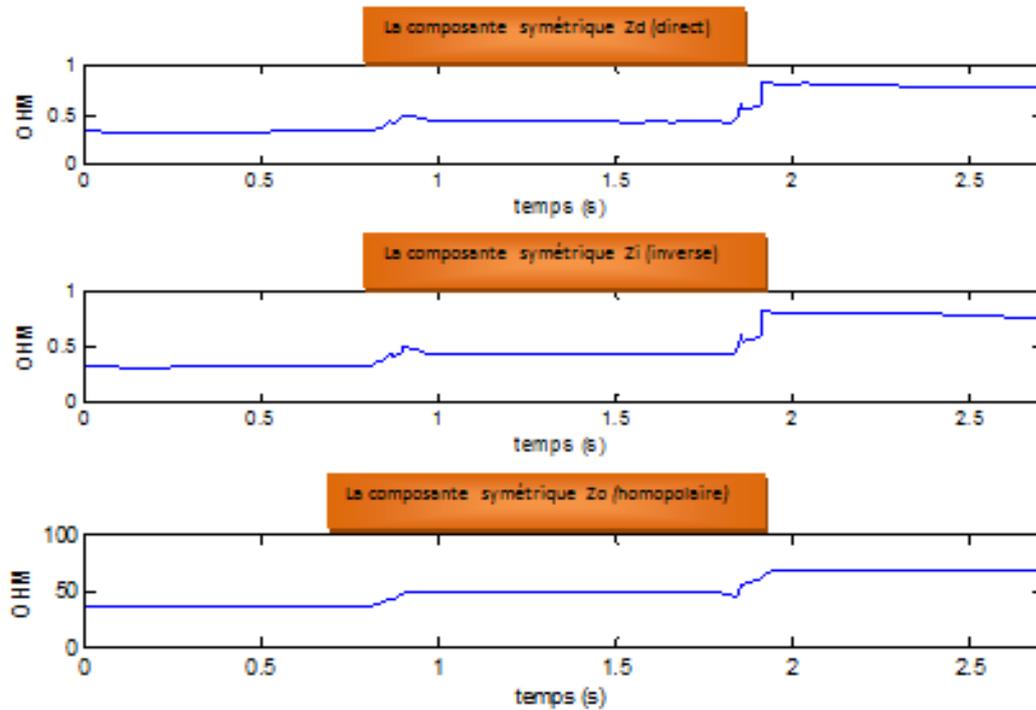


Fig. III.19: les impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état de variation de la charge.



**Fig. III.20:** La composante symétrique directe et inverse et homopolaire des impédances estimée du Signal

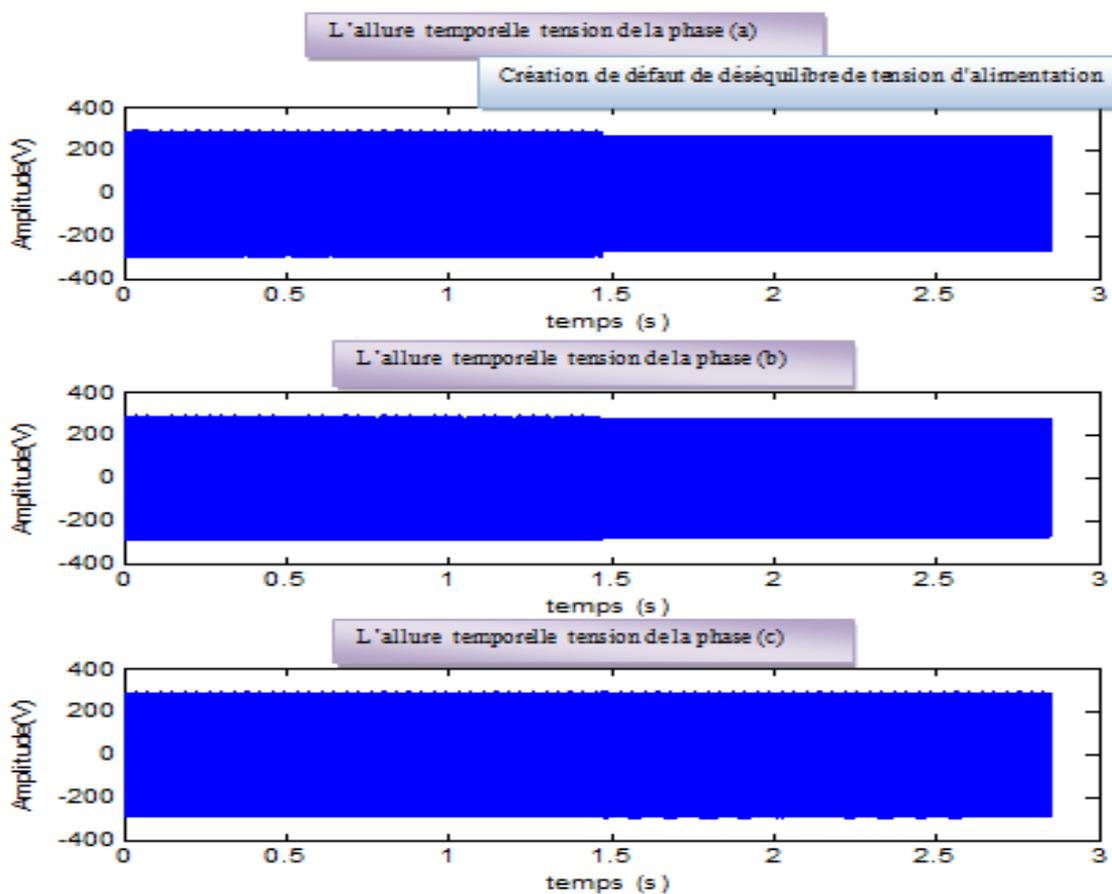
Les figures (III.18, III.19 et III.20), représentent l'évolution temporelle des courants, impédances et les composantes symétriques directe, inverse et homopolaire, lors d'une diminution brusque de la charge. Selon les figures (III.18, III.19) lorsque la charge diminue, on remarque des réductions dans les courants des trois phases. Par conséquent, il y aura une augmentation dans les amplitudes des impédances statoriques simultanément dans le même sens, ce qui est clairement différent au cas de court-circuit (figure III.15).

Suite à cette variation de charge, la figure III.20 montre que nos indicateurs de défaut, qui sont les composantes symétriques (directe et inverse), prennent une allure montée dans un sens semblable à celui correspondant au défaut de court-circuit (figure III.16.a et III.16.b). Par contre, on remarque que l'indicateur homopolaire varie dans le sens inverse (augmentation) par rapport à  $Z_0$  dans le cas de défaut de court-circuit (figure III.16.c); ce qui représente un outil supplémentaire permettant d'éviter les fausses alarmes dues à ce contrainte.

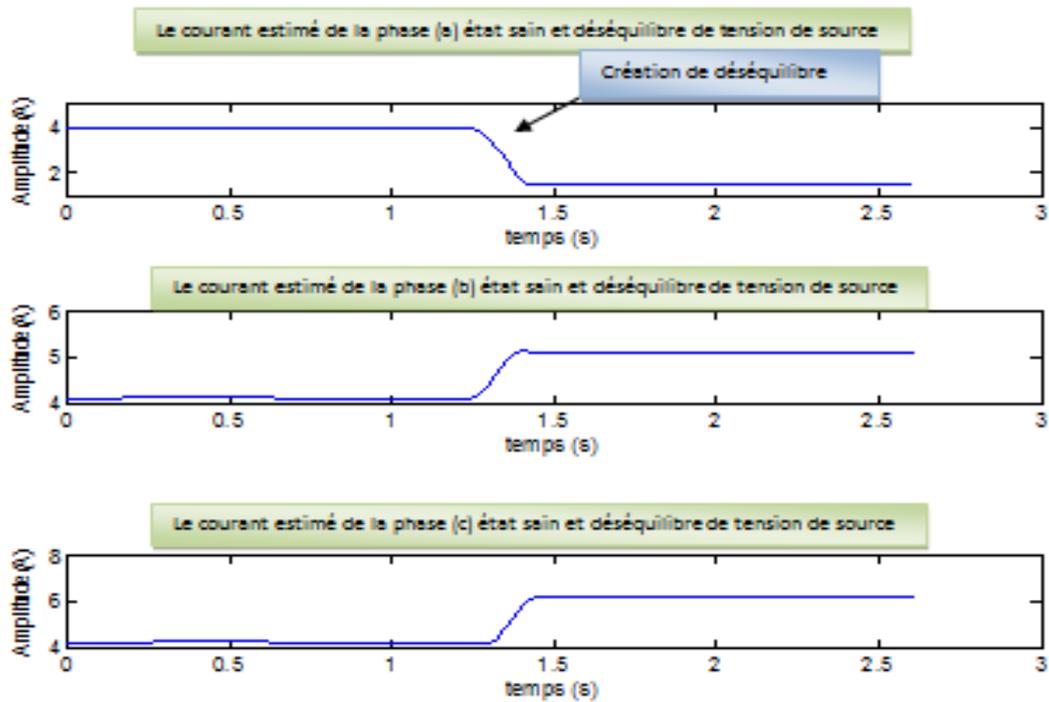
### III.7.3.2. Effet de déséquilibre de tension d'alimentation sur les indicateurs de défaut de court circuit

Les essais expérimentaux ont été effectués au sein du Laboratoire de modélisation du système énergétique (LMSE). Le moteur asynchrone triphasé à cage utilisé dans nos expérimentations est un moteur de 3 kW, en utilise deux rhéostats, trois capteurs de courant, trois capteurs de tension, un commutateur, et alimentation en tension réglable.

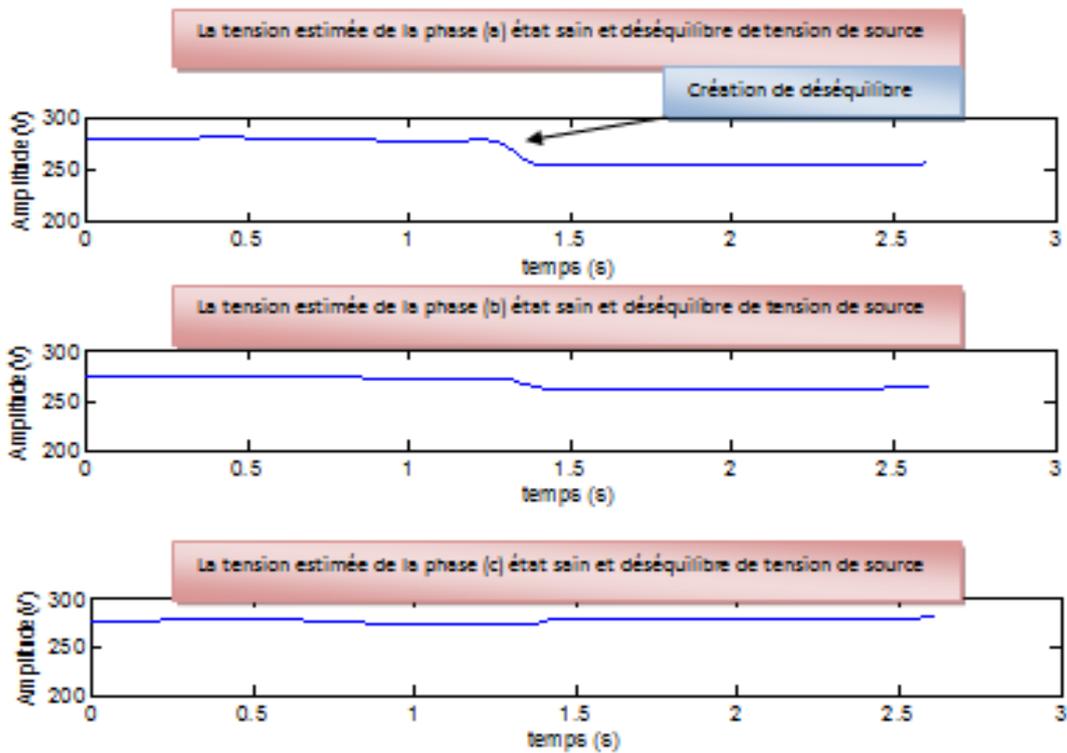
Dans un premier temps, on a lancé le moteur alimenté par des tensions équilibrées, et après quelques secondes, on a modifié la valeur du rhéostat branchée sur la phase A dont le but est de créer un déséquilibre de 10% dans les tensions d'alimentation.



**Fig. III.21 :** L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état sain et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.



**Fig. III.22 :** Les courants estimés du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état sain et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.



**Fig. III.23 :** Les tensions estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état sain et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.

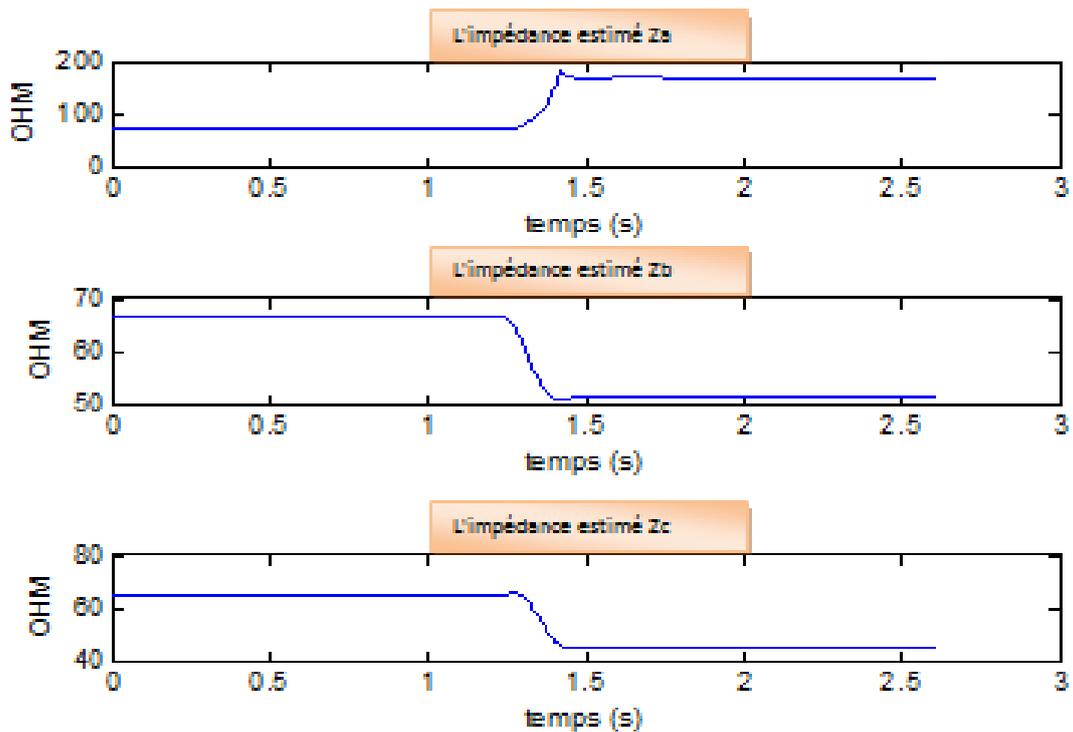


Fig. III.24 : Les impédances estimées du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état sain et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.

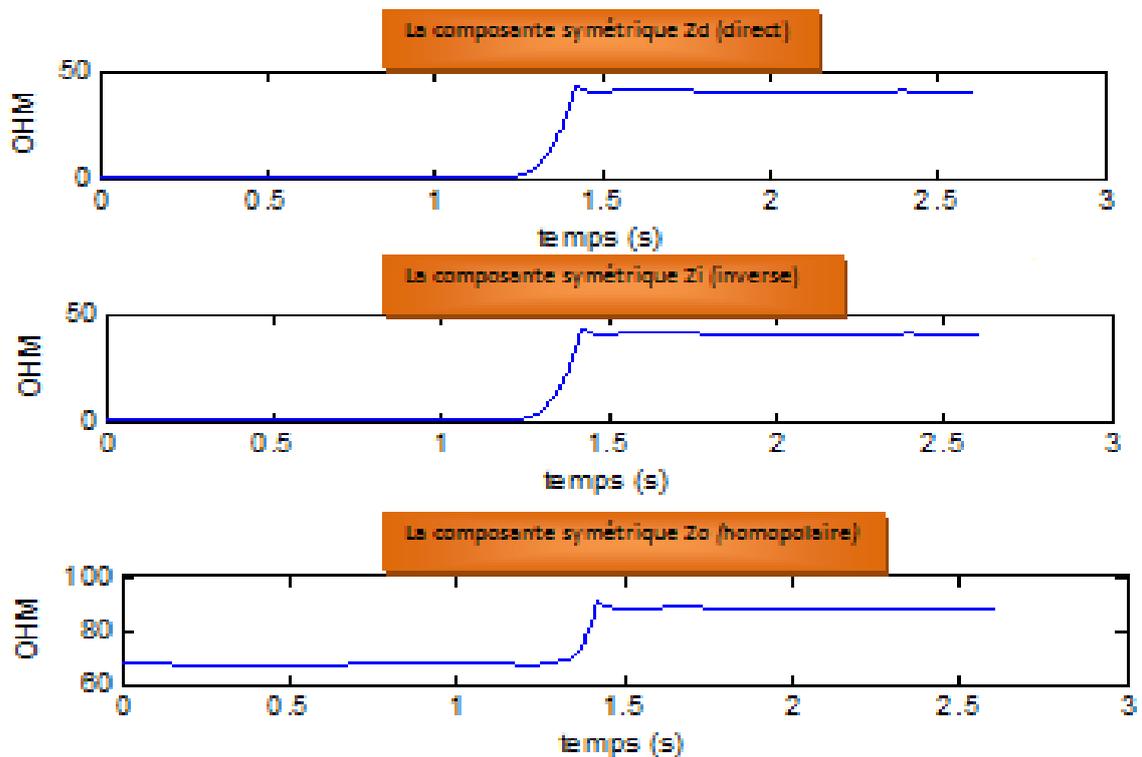


Fig. III.25 : La composante symétrique directe et inverse et homopolaire d'impédance estimée du Signal réel d'un moteur asynchrone 3kw à l'état sain et défaut de déséquilibre de tension d'alimentation de 10%.

Les figures (III.22, III.23), montrent une diminution dans les tensions des phases (a et b) à cause d'un problème de déséquilibre de tension d'alimentation introduit dans la phase (a). Nous remarquons que les courants et les tensions de la phase en défaut prennent la petite valeur d'amplitude, avec une augmentation dans les courants des deux autres phases, ceci est dû au couplage magnétique des trois phases statoriques.

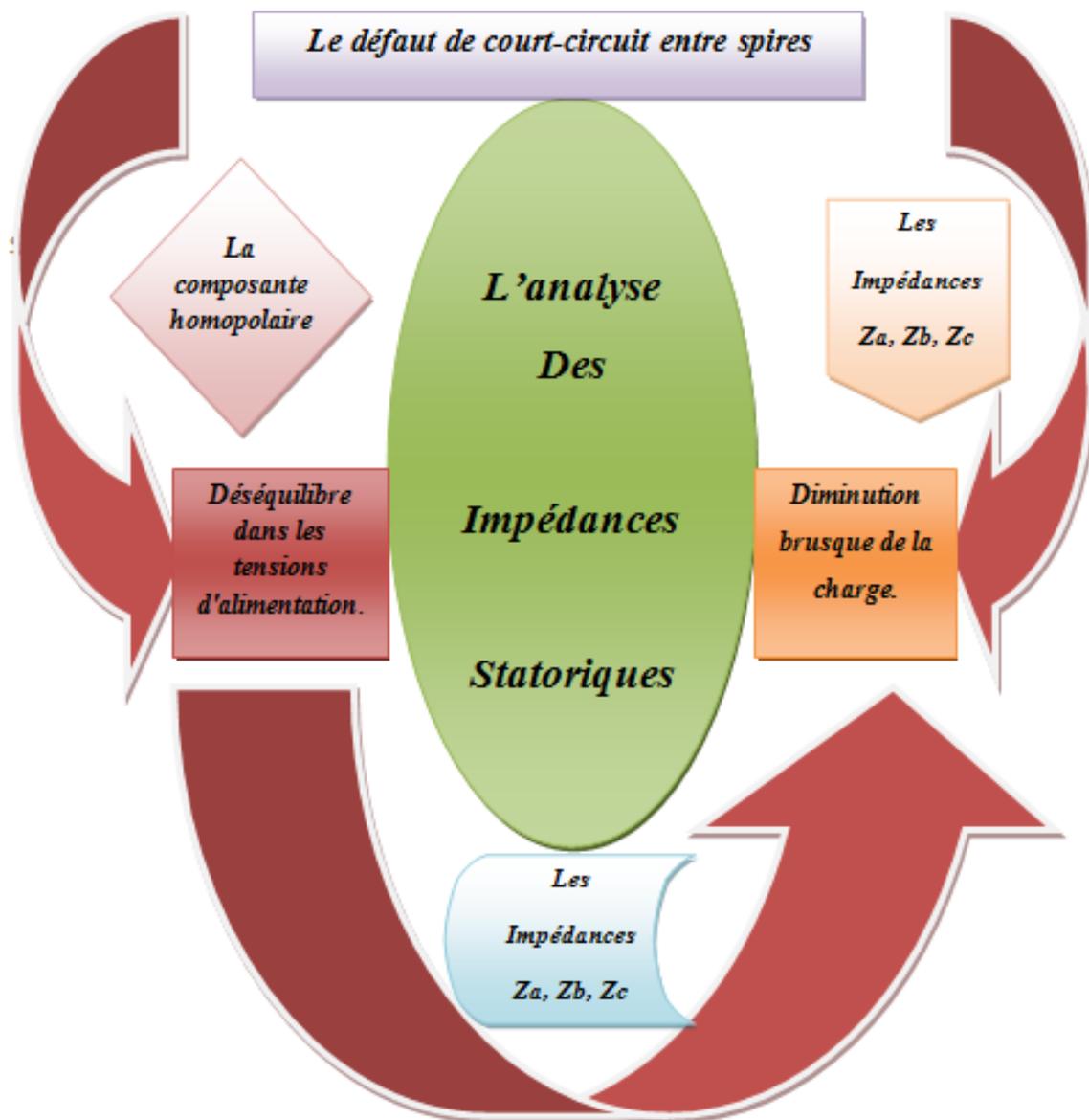
Selon la figure (III.24), on remarque qu'il ya un déséquilibre dans les impédances même à l'état sain dû aux imperfections du bobinage statorique. A l'instant  $t=1.4$  s, un déséquilibre dans les tensions de 10 % est introduit dans la phase « a ». On observe une augmentation sur l'impédance de la phase en défaut, et une diminution sur les impédances des deux autres phases (b,c). La figure (III.25.a et III.25.b), montre aussi que l'évolution des composantes symétriques ( $Z_d$  et  $Z_i$ ) est très semblable à celui correspondant au défaut de court-circuit figure (III.16.a et III.16.b). Par contre, la composante homopolaire ( $Z_o$ ) augmente significativement suite à la présence d'un déséquilibre de tension, ce qui est parfaitement le contraire au cas de court-circuit. Ceci peut être considéré comme un outil supplémentaire pour différencier entre un déséquilibre de tension et un défaut de court-circuit.

#### III.7.4. Interprétation des résultats

<b>Les cas étudiés</b>			
	<b>Diminution brusque de la charge.</b>	<b>Défaut de court-circuit entre spires dans la phase « b »</b>	<b>Déséquilibre dans les tensions d'alimentation</b>
<b>Les impédance <math>Z_a, Z_b, Z_c</math></b>			
<b><math>Z_a</math></b>	Augmentation	Augmentation	Augmentation
<b><math>Z_b</math></b>	Augmentation	Diminution	Diminution
<b><math>Z_c</math></b>	Augmentation	Diminution	Diminution
<b>Les composantes symétriques <math>Z_d, Z_i, Z_o</math></b>			
<b><math>Z_d</math></b>	Augmentation	Augmentation	Augmentation
<b><math>Z_i</math></b>	Augmentation	Augmentation	Augmentation
<b><math>Z_o</math></b>	Augmentation	Diminution	Augmentation

**Tab. III.1.** six indicateurs issus de l'analyse des impédances statoriques.

Notre étude effectuée nous a permis de définir six indicateurs de défauts de court-circuit entre spires statoriques :  $(Z_a, Z_b, Z_c)$  et  $(Z_d, Z_i, Z_o)$ . On a démontré qu'un diagnostic fiable de ce type de défaut, nécessite le suivi de l'évolution de tous les indicateurs définis. Ceci, nous a permis non pas la détection de défaut de court-circuit, mais aussi la séparation entre un possible chevauchement dû à la présence d'une variation dans la charge ou un déséquilibre dans les tensions d'alimentation (**Figure. III.26**).



**Figure. III.26.** la séparation entre un défaut de court-circuit entre spires et un problème de déséquilibre de tension ou variation dans la charge.

**III.8.Conclusion :**

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. La méthode proposée utilise six indicateurs issus de l'analyse des impédances statoriques. Ces indicateurs sont :  $(Z_a, Z_b, Z_c)$  et  $(Z_d, Z_i, Z_o)$ . L'étude effectuée montre qu'il n'y a pas un super-indicateur qui permet la détection de défaut de court-circuit entre spires. En fait, les résultats obtenus confirment l'importance de tous les indicateurs définis. L'exploitation de ces indicateurs permet non pas seulement la détection de défaut de court-circuit mais, elle permet également la séparation entre un défaut de court-circuit entre spires et un problème de déséquilibre de tension ou variation dans la charge. Ceci permet efficacement d'éviter les fausses alarmes.

**Conclusion**

**Générale**

# Conclusion Générale

---

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés. Nous avons focalisé l'étude sur les moteurs à cage, parce que les moteurs asynchrones à cage sont les plus répandus dans le monde industriel. Le court-circuit entre spires statoriques ont été le centre de notre intérêt dans ce présent travail.

Au début de ce travail, nous avons rappelé la terminologie sur la maintenance et le diagnostic des systèmes, constitution de la machine asynchrone, les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée à cage, ainsi que leurs causes, leurs conséquences. Par la suite, nous avons mis l'accent sur les différentes techniques utilisées pour la détection des défauts,

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le contenu spectral du courant statorique du moteur asynchrone triphasé à cage et nous avons montré la richesse de ce dernier en harmoniques d'une méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT), tel qu'on a identifié seulement quatre types d'harmoniques : les TH, les RSH, les EFH et RBFH. Nous avons distingué une étude sur spectre du courant statorique avec défaut de court circuit entre spires par l'application 'FFT' (Fast Fourier transform), ceci pour savoir le type d'harmonique qu'il faut choisir pour la détection de défaut de court circuit entre spires statorique malheureusement. On a remarqué par ailleurs que le défaut court-circuit entre spires statoriques n'a pas de signatures fréquentielles propres dans le spectre du courant statorique.

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., avec six indicateur de défaut issus sur l'analyse des impédances statoriques, nous avons analysé les états des fonctionnements du moteur (état sain, état défaut de court circuit entre spires statoriques, Diminution brusque de la charge et le cas de déséquilibre dans la source de tension ) et suivre l'évaluation de six l'indicateurs : ( $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$ ) et ( $Z_d$ ,  $Z_i$ ,  $Z_o$ ). De sorte que qu'il n'y a pas un super-indicateur avec détecter les déférant cas de fonctionnements pour vu la robustesse de la technique proposé dans la détection de défaut étudié et pour la différencier entre les cas de fonctionnements, Ceci permet efficacement d'éviter les fausses alarmes.

# Bibliographie

---

## Bibliographie

**[KHB15]:** 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.

**[AZO17]:** AZOUZE, Taki Eddine, « Détection des défauts de court-circuit entre spires Statoriques par l'analyse du courant », Mémoire de Master, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2015.

**[MER07]:** MERADI, Samir, « Estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone en vue de diagnostic des défauts rotoriques », Mémoire de Magister, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2007.

**[GAO12]:**GAOUAOUI, Mohammed, «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à la machine asynchrone», Mémoire de Magister, Faculté de génie électrique et d'informatique département automatique, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

**[GHO05] :** GHOGGAL, Adel, «Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts», Mémoire de magistère, département d'électrotechnique, Université de Batna, 2005.

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

**[YHY12] :** YAHIA, Khaled, « Contribution au diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche Signal», Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2012.

**[CHE 14] :** CHERIF, Hakima, « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes», Thèse de Magister, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2014.

**[KHL15]:** LAADJAL, Khaled, «Modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts par flux 2d», Mémoire de Master, département d'électrotechnique, Université de Biskra, 2015.