

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

Université Abderrahmane Mira de Béjaia



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Université A. Mira de BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

SPÉCIALITÉ : MAINTENANCE INDUSTRIELLE

Thème

**DIAGNOSTIC PAR ANALYSE DU COURANT D'UNE
GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE A ROTOR BOBINÉ**

Réalisé par:

BOUGHANEM FAHEM

Encadré par:

Mr IMAOUCHEN. Y

Soutenu le 19 Septembre 2022 devant le jury composé de :

HAMMOUDI	Président
LAGGOUNE	Examineur
IMAOUCHEN	Encadreur

2021-2022

Dédicace

“

*J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail aux personnes
les plus chères au monde : À Mes très chers parents Sans
eux je ne serai pas là. Eux qui m'ont appris que la vie est
un défi à vivre joyeusement et à ne jamais baisser le bras
quel que soit les obstacles,*

*À Sans oublier tous mes amis(e) et tous ceux qui me sont
chers,*

À tous ceux qui me sont chers, à vous tous

Merci.

”

- Fahem

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la faculté de technologie de l'université de Béjaia, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. A ce jeu, il est impossible de ne pas oublier des noms. On voudrait présenter d'avance nos excuses à ceux qui pourraient alors subir les affres de l'oubli.

Je tiens à remercier également mon promoteur **Y. IMAOUCHEN** pour son aide immense, la qualité de son suivie ainsi que pour tous les conseils et les informations qu'il m'a prodigués avec un degré de patience et de professionnalisme sans égal.

Je tiens à remercier particulièrement, **Mr : Noureddine Bessous** (Professor - University of El Oued), qui n'a ménagé aucun effort, et qui n'a cessé de m'apporter soutien et aide technique et morale.

Que les membres de jury trouvent, ici, l'expression de mes sincères remerciements pour l'honneur qu'ils me font en prenant le temps de lire et d'évaluer ce travail.

Pour finir, je souhaite remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Dans cette étude, nous abordons le diagnostic des défauts rotoriques dans la génératrice asynchrone à rotor bobiné. Après avoir décrit les différents éléments de constitution d'une génératrice asynchrone et les principaux défauts pouvant survenir sur ceux-ci, nous mettons en évidence l'importance de l'analyse des harmoniques d'espace pour le diagnostic des défauts rotoriques. Après avoir étudié les phénomènes créés par le défaut rotorique sur les différentes grandeurs temporelles de la machine, nous présentons une approche permettant la détection des défauts. La méthode s'appuie sur l'évaluation de plusieurs indices calculés à partir de l'amplitude des composantes fréquentielles présentes dans les spectres du courant absorbé par le moteur.

La méthode proposée, validée à partir de plusieurs essais expérimentaux a permis la détection d'un défaut rotorique naissant pour différents couples de charge.

Mots clés : Génératrice asynchrone, Harmoniques d'espace, Diagnostic, L'amplitude.

Abstract

In this study, we deal with the diagnosis of rotor faults in the wound rotor asynchronous generator. After having described the various elements of the constitution of an asynchronous generator and the principal defects that can occur on these, we highlight the importance of the analysis of the space harmonics for diagnosing the rotor defects. After studying the phenomena created by the rotor fault on the different temporal quantities of the machine, we present an approach allowing the detection of faults. The method is based on evaluating several indices calculated from the amplitude of the frequency components present in the spectra of the current absorbed by the motor.

The proposed method, validated from several experimental tests has allowed the detection of a developing rotor fault for different load torques.

Key words : Asynchronous generator, Space harmonics, Diagnosis, Amplitude.

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
Introduction générale	1
1 Grandeurs électriques et mécaniques pour l'aide au diagnostic	2
1.1 Introduction	3
1.2 Génératrice asynchrone à rotor bobinée	3
1.2.1 Composantes de la génératrice asynchrone à rotor bobinée	4
1.3 Principe de fonctionnement de la génératrice asynchrone	5
1.4 Grandeurs électriques et mécaniques	6
1.4.1 Grandeurs électriques	6
1.4.2 Grandeurs mécaniques	7
1.5 Défaillances de la génératrice asynchrone	7
1.5.1 Les principaux défauts dans les machines électriques	7
1.5.2 Présentation des défauts mécaniques	7
1.5.3 Défaillances d'ordre électrique	9
1.6 Techniques de diagnostic de la génératrice asynchrone	10
1.6.1 Diagnostic par analyse du courant statorique	10
1.6.2 Diagnostic par analyse vibratoire	10
1.6.3 Diagnostic par analyse du couple	12
1.7 Conclusion	13
2 Outils de traitement de signal pour le diagnostic par analyse du courant	14
2.1 Introduction	15
2.2 Simulation et analyse d'un signal périodique	15
2.2.1 Signal sinusoïdal	15
2.2.2 Somme de signaux sinusoïdaux	16
2.3 Simulation et analyse d'un signal modulé	17
2.3.1 Modulation d'amplitude	18
2.3.2 Modulation de fréquence	19
2.4 Effet des paramètres d'échantillonnage	20
2.4.1 Fréquence d'échantillonnage	20

2.4.2	Nombre d'échantillonnages	20
2.5	Application d'analyse d'enveloppe	21
2.5.1	Signal modulé en amplitude	22
2.5.2	Signal modulé en fréquence	23
2.6	Conclusion	24
3	Diagnostic d'un défaut de déséquilibre au rotor d'une génératrice éo- lienne	25
3.1	Introduction	26
3.2	Description du banc d'essai étudié	26
3.3	Analyse des mesures du courant statorique sur la génératrice	27
3.3.1	Analyse du courant statorique lors d'entraînement à 1520 tr/min	29
3.3.2	Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1525 tr/min	30
3.3.3	Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1540 tr/min	31
3.3.4	Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1553 tr/min	32
3.3.5	Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1585 tr/min	33
3.3.6	Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1600 tr/min	34
3.4	Effet de la variation de la charge et de la gravité du défaut sur le contenu spectral du courant statorique	35
3.5	Conclusion	37
	Conclusion générale	38
	Bibliographie	41

Table des figures

1.1	Génératrice asynchrone	3
1.2	Stator en cours de bobinage	4
1.3	Stator (vue d'ensemble)	4
1.4	Rotor bobiné	5
1.5	Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone	6
1.6	Organigramme des différentes étapes de détection des défauts [1].	11
2.1	Signal sinusoïdal et spectre correspondant.	16
2.2	Représentations temporelle et fréquentielle d'une somme de signaux sinusoïdaux.	17
2.3	Modulation d'amplitude.	18
2.4	Représentation temporelle de la modulation de fréquence.	19
2.5	Représentation fréquentielle de l'effet de fréquence d'échantillonnage.	20
2.6	Représentation fréquentielle de l'effet de nombre d'échantillonnages.	21
2.7	(A) le signal simulé $s_2(t)$, et (B) spectre de son enveloppe.	22
2.8	(A) Signal son modulé en amplitude, et (B) Spectre correspondant.	23
2.9	(A) Signal son modulé en fréquence "forme d'onde" (B) Spectre correspondant.	24
3.1	Banc d'essai d'une génératrice éolienne dédié pour le diagnostic des défauts [32].	26
3.2	Schéma représentatif du banc d'essai pour diagnostic des défauts d'une génératrice éolienne.	27
3.3	Représentation temporelle des mesures du courant statorique de la génératrice lors de l'entraînement à 1520 tr/min avec rotor : (A) sans défaut, (B) déséquilibré à 21% et (C) déséquilibré à 43%.	29
3.4	Spectres des courants statoriques lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré à 21% et (C) déséquilibré à 43%.	30
3.5	Spectres d'enveloppes des courants statoriques lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré à 21% et (C) déséquilibré à 43%.	30
3.6	Représentation temporelle des mesures du courant statorique de la génératrice lors de l'entraînement à 1525 tr/min : (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	30
3.7	Spectres du courant statorique lorsque le rotor est : (A) déséquilibré, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré de 43%	31
3.8	Spectres d'enveloppes des courant statorique en subissant de transformation de Hilbert lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	31

3.9	L'amplitude du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	31
3.10	Spectres du courant statorique lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	32
3.11	Spectres d'enveloppes des courant statorique en subissant de transformation de Hilbert lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	32
3.12	L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	32
3.13	L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	33
3.14	L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	33
3.15	L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	33
3.16	Spectres du courant statorique lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	34
3.17	Spectres d'enveloppes des courant statorique en subissant de transformation de Hilbert lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	34
3.18	L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	34
3.19	Spectres du courant statorique lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	35
3.20	Spectres d'enveloppes des courant statorique lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%	35
3.21	Evolution de l'amplitude à la fréquence caractéristique ($2gf_s$) en fonction de la gravité du défaut de déséquilibre (0%, 21% et 43%) pour chacune des charges	36

Liste des tableaux

1.1	Les différents défauts des machines électriques.	7
1.2	Tableau récapitulatif des causes et conséquences sur le système des principales dégradations d'origine mécanique.	8
1.3	Classification des défauts magnétiques	12
2.1	Coefficients d'amplitude	23

Liste des sigles et acronymes

MCSA	<i>Motor Curent Signature Analysis</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transforms</i>
MA	<i>Modulation D'amplitude</i>
MF	<i>Modulation de Fréquence</i>
TH	<i>Transformée de Hilbert</i>
GAs	<i>Génératrice Asynchrone</i>
GADA	<i>Génératrice Asynchrone à Double Alimentation</i>
MCC	<i>Machine À Courant Continue</i>
MATLAB	<i>Logiciel de calcul numérique</i>
SIMULINK	<i>Extension graphique de Matlab, qui permet des diagrammes en block</i>

Introduction générale

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Il existe deux grandes familles utilisées dans le domaine du diagnostic à savoir les méthodes à base de modèle analytique, et les méthodes sans modèle. Les méthodes sans modèle sont basées sur l'extraction d'informations par le biais du traitement des signaux mesurés. Les signaux mesurables (les courants, les tensions, la vitesse, les vibrations, la température, les émissions sonores) peuvent fournir des informations significatives sur les défauts.

Le travail, présenté dans ce mémoire, repose sur le Diagnostic par analyse du courant d'une génératrice asynchrone à rotor bobinée à l'aide des méthodes de traitement du signal, en se basant sur l'analyse des courants statoriques mesurés par un ou plusieurs capteurs qui donnent une image sur le courant statorique. Cette méthode d'analyse a pris une place prépondérante dans les approches de détection et de diagnostic de défauts vu sa simplicité et son efficacité.

Dans le premier chapitre de ce document, nous présentons dans un premier temps les composantes de la génératrice asynchrone à rotor bobinée et leur principe de fonctionnement ainsi que les grandeurs électriques et mécaniques pour l'aide au diagnostic. Dans un deuxième temps, nous présentons les différentes défaillances pouvant l'affecter. Nous terminons ce chapitre par une analyse des différentes techniques de diagnostic existantes en présentant leurs points faibles et leurs points forts.

Le deuxième chapitre rappelle les Outils de traitement de signal pour le diagnostic par analyse du courant des signaux électriques utilisées dans la détection des défauts liés à une machine électrique. Ensuite, on présentera une étude de quelques signaux simulés sur matlab/simulink.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus lors d'exploitation des méthodes d'analyse présentées dans les chapitres précédents, sur les signaux de courant mesurés sur un banc d'essai d'une génératrice asynchrone à double alimentation. L'analyse de ces signaux est effectuée par calcul du spectre de Fourier et analyse d'enveloppe.

Chapitre 1

Grandeurs électriques et mécaniques pour l'aide au diagnostic

1.1 Introduction

Les machines tournantes, telles que les moteurs asynchrones et les générateurs, sont des composants importants dans les applications industrielles et la production d'énergie, occupant actuellement une forte présence dans les applications impliquant le système puissance de transmission. Ces machines peuvent être affectées par des pannes potentielles ou un impact sur la production, c'est pourquoi ils ont besoin de niveaux élevés de fiabilité et de disponibilité. Une défaillance prématurée crée des coupures planes, endommage la machine et cause des pertes financières considérables. Le diagnostic des moteurs asynchrones s'est beaucoup développé dans le domaine industriel car pour certains, le désir d'avoir une chaîne de production de plus en plus sécurisée devient application essentielle.

La ligne de production doit être équipée d'un système de protection fiable, car tout dysfonctionnement, même le plus léger, peut entraîner dommages matériels ou blessures corporelles inévitables. Pour éviter ces problèmes, la recherche dans le monde entier a été consacrée au développement de méthodes de diagnostic pendant des décennies.

1.2 Génératrice asynchrone à rotor bobinée

En concurrence à la technologie synchrone que nous avons abordée dans la partie précédente, la technologie asynchrone a su aussi s'imposer dans le domaine de la production d'énergie électrique à base d'éolienne. Deux topologies peuvent être utilisées, à savoir celle reposant sur un rotor bobiné et celle basée sur un rotor à cage, avec bien entendu pour chacune d'entre elles des avantages et inconvénients. Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter ces deux approches.

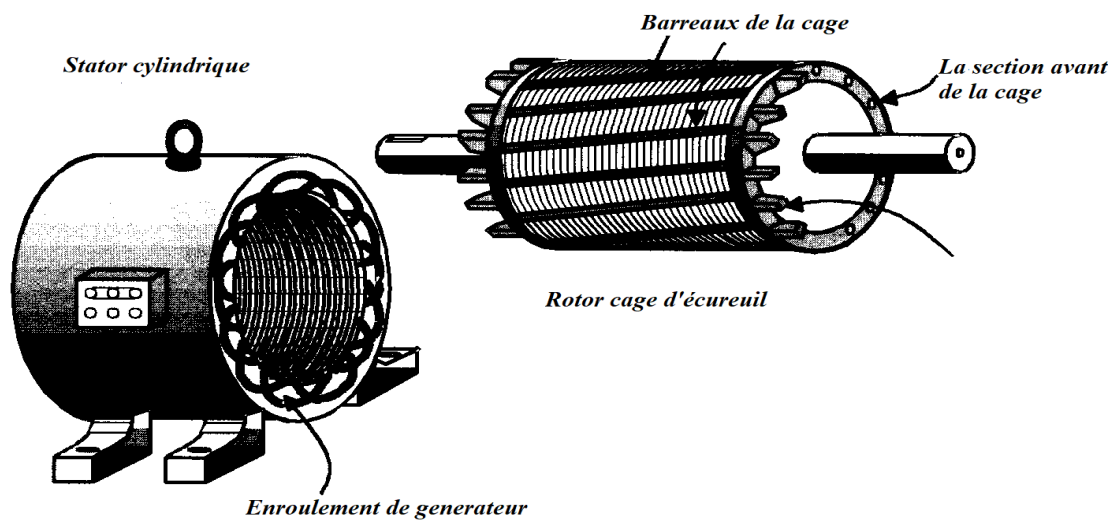


Fig. 1.1. Génératrice asynchrone

- En utilisant dans les cas où nous avons besoin d'une vitesse variable
La génératrice asynchrone à cage est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe. Son principal intérêt réside dans l'absence de contacts électriques par balais-collecteurs, ce qui conduit à une structure simple, robuste et facile à construire.
La génératrice asynchrone Figure (1.1), peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse de vent.

1.2.1 Composantes de la génératrice asynchrone à rotor bobiné

Les Générateurs asynchrones à rotor bobiné peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

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

- Le stator

Il est constitué d'une couronne de tôles minces (0,35 mm) empilées, caractérisées par des pertes allant de 1,6 à 2,3 W/kg à 50 Hz [7], Cette couronne est serrée dans une carcasse. Débouchant à l'intérieur de l'anneau ainsi formé, des encoches contiennent un enroulement triphasé. Cet enroulement peut être bipolaire, tétra polaire, etc. Figures (1.2 et 1.3), les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque à bornes.

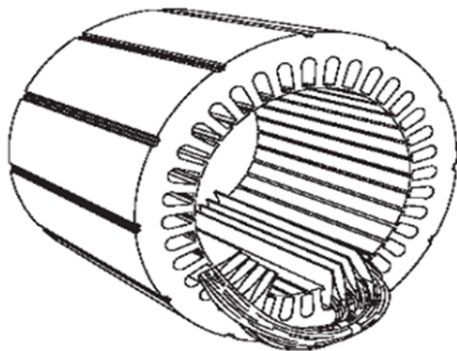


Fig. 1.2. Stator en cours de bobinage

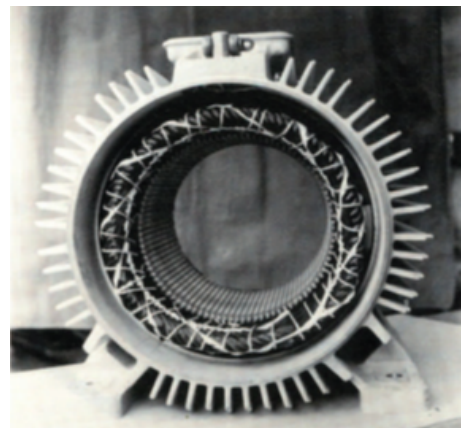


Fig. 1.3. Stator (vue d'ensemble)

- Le rotor bobiné

Le rotor bobiné a un ensemble des enroulements triphasés qui sont semblables aux enroulements sur le stator. Les trois phases des enroulements du rotor sont couplées généralement en Y, et les extrémités des trois fils du rotor sont attachés aux bagues

collectrices sur l'arbre du rotor. Les enroulements du rotor sont court-circuités à travers des brosses circulant sur les bagues collectrices.

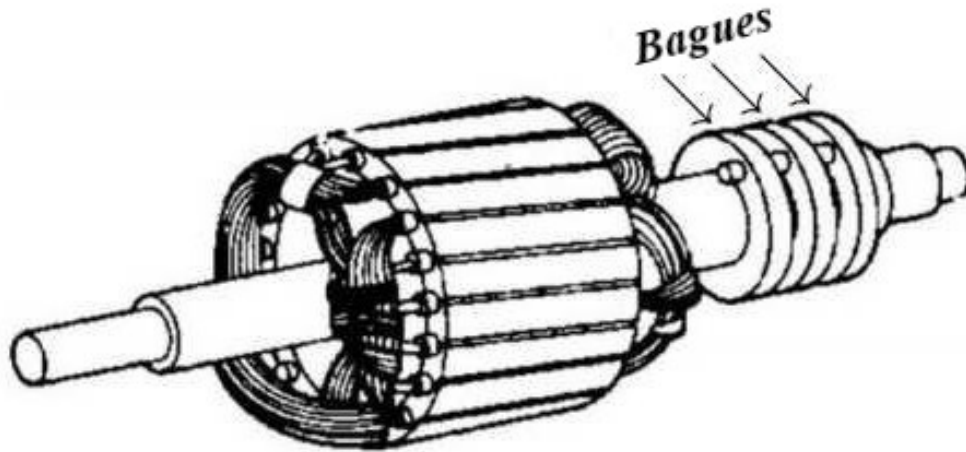


Fig. 1.4. Rotor bobiné

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépendent principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il sera fait. Le rotor de la machine asynchrone est aussi Pour vu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre la Figure (1.4). Le stator et le rotor sont séparés par un entrefer très faible, de l'ordre de (0,2 à 3 mm suivant la puissance) [7].

1.3 Principe de fonctionnement de la génératrice asynchrone

La génératrice asynchrone n'engendre pas sa propre énergie d'excitation contrairement à l'alternateur. Pour cette raison, il faudra lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence. Dans un entraînement à vitesse fixe, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

Le couple mécanique entraînant tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau Figure (1.5).

Dans un fonctionnement autonome, on connecte aux bornes du stator un banc de condensateurs correctement dimensionnés et on fait tourner le rotor de la machine à la vitesse nécessaire. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est

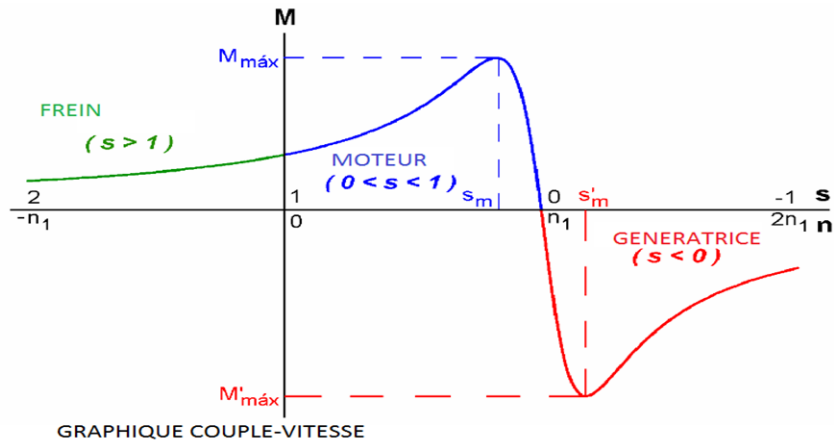


Fig. 1.5. Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone

indispensable pour l'auto-amorçage de la génératrice. Le condensateur fournit le courant d'excitation requis par la génératrice et la génératrice charge le condensateur pour augmenter la tension de sortie. C'est cette réaction cyclique qui permet à la génératrice d'arriver à un régime permanent situé dans la zone de saturation [7].

1.4 Grandeurs électriques et mécaniques

Nous considérons ici qu'une machine électrique est un système qui va réagir à son environnement en générant un certain nombre de grandeurs exploitables pour le diagnostic.

1.4.1 Grandeurs électriques

Intensité de courant

Le courant électrique correspond à un déplacement de particules électriques appelées électrons. L'intensité en un point du circuit correspond au débit du courant en ce point, autrement dit à la quantité d'électrons qui traversent une section du circuit par unité du temps, est une grandeur ayant pour symbole (I) et pour unité l'ampère (A) [28].

La puissance électrique

Il s'agit de l'énergie produite ou consommée par unité de temps. Sa définition mathématique est le rapport mathématique ΔE : l'énergie produite ou consommée durant une durée Δt .

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (1.1)$$

La puissance se mesure en watts, une unité égale à un joule (unité d'énergie) divisée une seconde [28].

1.4.2 Grandeurs mécaniques

La vitesse

Est le rapport d'une longueur par un temps. Son unité du système international est le mètre par seconde (m/s). La vitesse ayant une direction et une intensité. La vitesse est représentée par un vecteur de vitesse [29].

Le couple électromagnétique

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_s , elles glissent sur le rotor, qui lui, il tourne à la vitesse Ω , l'action de l'ensemble des forces électromagnétiques, il réduit à l'application d'un moment de couple électromagnétique [28].

$$Cem = \frac{P_{mec}}{\Omega} \quad (1.2)$$

avec : P_{mec} est la puissance mécanique de la machine, et Ω est la vitesse de rotation de son arbre.

1.5 Défaillances de la génératrice asynchrone

1.5.1 Les principaux défauts dans les machines électriques

Le diagnostic des machines électriques est un domaine arrivé à maturité dans le cas stationnaire. Le tableau (1.1) résume l'ensemble des défauts susceptibles d'être détecté par l'emploi d'une méthode adaptée [14, 4].

Tab. 1.1. Les différents défauts des machines électriques.

<i>Défauts électrique</i>	<i>Défauts mécaniques</i>
<i>Courts-circuits</i>	<i>Roulements</i>
<i>Rupture de barres</i>	<i>Excentricité du rotor</i>
<i>Courant de fuits...</i>	<i>Boite de vitesses</i>
	<i>Défauts d'alignement...</i>

1.5.2 Présentation des défauts mécaniques

Nous avons vu dans la sous-section 1.1.3 que de nombreuses défaillances d'origine mécanique pouvaient apparaître dans les applications industrielles entraînées par des moteurs asynchrones. Ces défauts peuvent survenir du côté moteur (défaut de roulements), du côté charge (balourd) ou encore sur la transmission (défaut de courroie(s) ou de boite de vitesse) et l'accouplement (mauvais alignement). De nombreux phénomènes physiques peuvent initier ou accélérer le développement de ces dégradations. Parmi ceux-ci, nous

pouvons notamment citer les problèmes d'alignement, d'environnement extrême (température, corrosion, etc.) ou encore d'utilisation excessive du moteur (surcharge, sur vitesse, à-coups de couple, démarrages intempestifs, etc...). Afin de faciliter la compréhension des modes de défaillance des défauts mécaniques concernés par notre étude, une liste (non-exhaustive) des causes physiques accélérant leur développement est présentée pour chacun d'entre eux dans le Tableau (1.2) [7].

Tab. 1.2. Tableau récapitulatif des causes et conséquences sur le système des principales dégradations d'origine mécanique.

Défaut	Causes physiques	Conséquences sur le système	Réf
<i>Défaut de Roulements</i>	- Contraintes mécaniques, - Défaut de montage, - T°C élevée, - Mauvaise lubrification, corrosion, contamination, etc...	- Excentricité du rotor, - Oscillations de couple, - Balourd, - Niveaux de vibrations et de température élevés.	[24]
<i>Défaut de Courroies</i>	- T°C élevée, contamination, - Poulies désalignées, - Charge excessive, à-coups de couple, battements, etc	- Patinage excessif, - Usure des poulies, - Rupture des courroies.	[31]
<i>Balourd</i>	- Encrassement, usure, et/ou érosion des pales (ventilateurs/pompes), - Courbure de l'arbre, - Défaut de roulement.	- Vibrations excessives, oscillations de couple, - Accélération du vieillissement de certains éléments à cause des efforts radiaux.	[25] [18] [26]
<i>Défaut de boîte de vitesse</i>	- Charge et/ou vitesse anormalement élevée. - Fatigue mécanique,	- Vibrations et température excessives, - Oscillations de couple.	[21] [17]
<i>Défaut d'alignement</i>	— Défaut de montage, — Usure des parties mécaniques	- Usure des roulements et accouplements, - Courbure de l'arbre, - Oscillations de couple	[20] [4]

En analysant les causes physiques des défauts mécaniques présentées dans ce tableau, nous pouvons constater que certains défauts sont interdépendants. Par exemple, un mauvais alignement du moteur avec sa charge ou la présence d'un balourd dans le système peuvent générer des contraintes mécaniques excessives sur les roulements et accélérer ainsi leur

dégradation. Il est donc important de pouvoir détecter chacun de ces défauts le plus rapidement possible afin que leur impact sur les autres éléments du système soit le plus faible possible.

Les conséquences de ces défauts sur les systèmes électromécaniques ont également été indiquées dans le tableau 1.2. Celles-ci n'ont pas toutes été mentionnées mais nous pouvons tout de même remarquer que ces défauts génèrent un vieillissement accéléré des différentes parties du système (courbure d'arbre, contraintes mécaniques, température et vibrations extrêmes). De plus, une intervention trop tardive peut entraîner la destruction des éléments mécaniques concernés et provoquer une indisponibilité du matériel dont les conséquences financières peuvent être très importantes (cf. sous-section 1.1). Enfin, nous pouvons constater que de nombreux défauts génèrent des vibrations élevées, des oscillations de couple ou encore une excentricité du rotor. Ces phénomènes sont susceptibles d'affecter les grandeurs électriques, magnétiques et mécaniques du système et il est par conséquent envisageable de les analyser en ligne, i.e. durant le fonctionnement de l'application, pour détecter l'apparition de ces différents défauts.

1.5.3 Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [6].

Défaillances de courts-circuits statorique

Un défaut de court-circuit se schématise par la connexion franche entre deux points du bobinage. Les courts circuits entre phases apparaissent préférentiellement dans les enroulements de phases différentes et dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celle-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. Les courts -circuits entre spires de la même phase peuvent apparaître soit au niveau des têtes de bobines, soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution de nombre de spires effectives de la bobine et de toute façon des spires de court-circuit. Néanmoins, les têtes de bobines sont les plus exposées (croisement de faisceaux).

1. Court-circuit dans une phase :

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

- Court-circuit spire- neutre : Ce court-circuit est simulé par la connexion des spires à l'aide de conducteur lié au neutre.
- Court-circuit au milieu de la phase : Si le court-circuit se manifeste au milieu du bobinage (20% de spires en court-circuit).

2. Court-circuit entre phases différentes :

Un court-circuit entre phases différentes proche de l'alimentation provoquerait des courants très forts qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation. Et par conséquent l'arrêt immédiat de la machine par le biais des relais de protection.

1.6 Techniques de diagnostic de la génératrice asynchrone

Les techniques de diagnostic des défauts de la génératrice asynchrone sont basés essentiellement sur l'emplacement des harmoniques qui reflètent la nature anomalies en

question. ont représenté par l'organigramme de la Figure (1.6) que nous souhaitons réaliser très prochainement pour futures investigations.

1.6.1 Diagnostic par analyse du courant statorique

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée, car le spectre est une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au à d'une machine électrique. Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes à la fréquence $f_s\{(1 + 2gk)\}$ dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état du rotor [10].

Cette technique est dénommée dans la littérature ” *Motor Curent Signature Analysis* ” (MCSA). Les défauts de la génératrice asynchrone à rotor bobiné se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- Les raies spectrales qui apparaissent avec des fréquences qui sont directement liées à la vitesse de rotation, à la vitesse du champs tournants et aux paramètres physiques de la génératrice asynchrone.
- Les raies spectrales ont une modification de leurs amplitudes, dans les spectres du courant.

Les techniciens de la surveillance doivent avoir une bonne connaissance des défauts et leurs signatures à partir du courant statorique.

1.6.2 Diagnostic par analyse vibratoire

L'analyse spectrale de la vibration a été utilisée dans les machines tournantes pour le diagnostic pendant des décennies, il est affirmé que la surveillance des vibrations est les méthodes les plus fiables d'évaluer la santé globale d'un système rotor. Les forces radiales, créées le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine électrique. Ces forces sont proportionnelles au carné de l'induction magnétique.

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la $F.m.m$ (F_m) et de la perméance (P) [30].

D'une manière générale, les défauts magnétiques pouvant causer des vibrations, peuvent

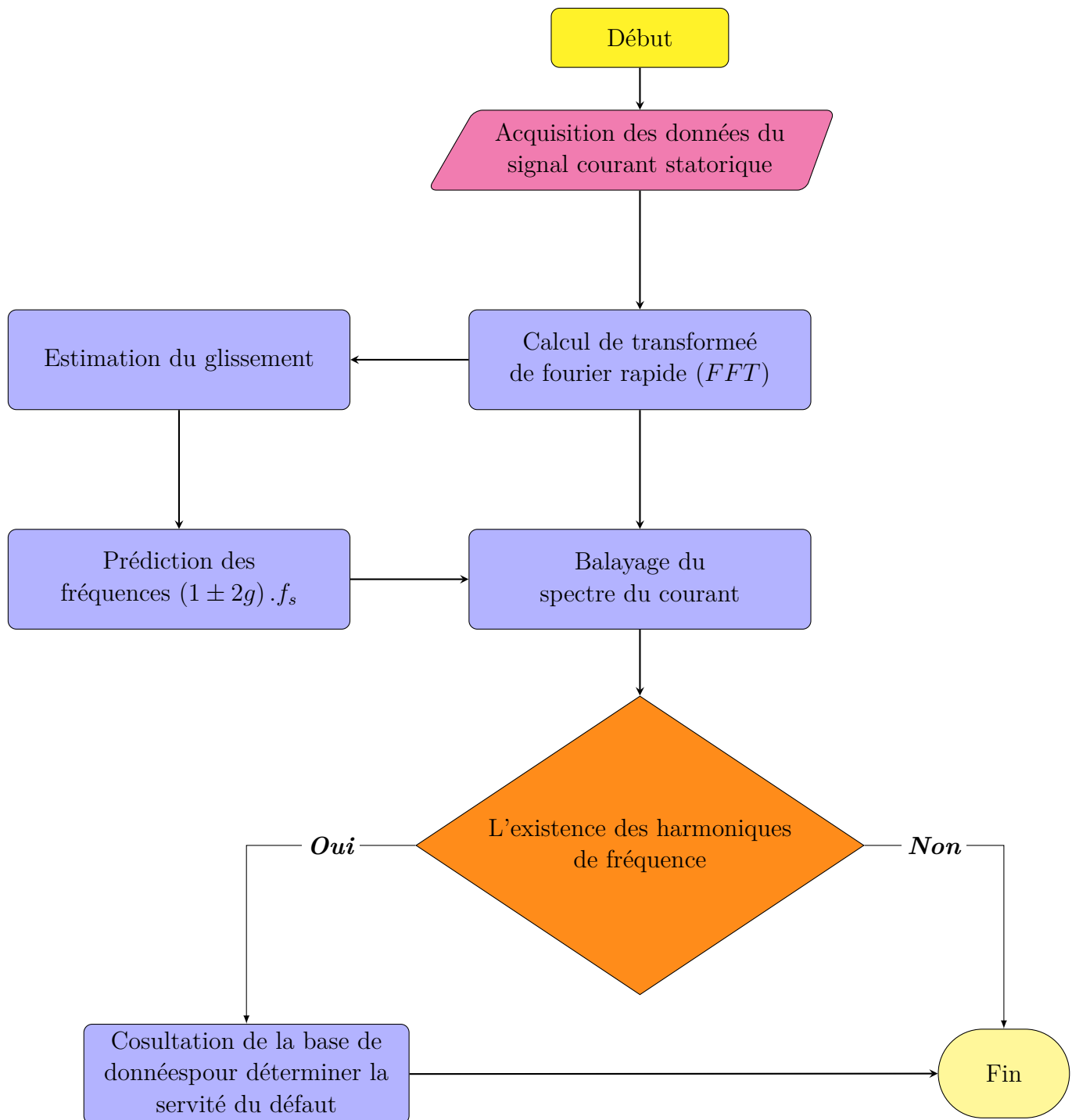


Fig. 1.6. Organigramme des différentes étapes de détection des défauts [1].

être classés en deux catégories « défauts tournants » et « défauts stationnaires » Tableau (1.3). Mais en plus de ça, les balourds mécaniques et thermiques, les défauts de roulements, les mauvaises fixations et erreurs de fondation, les problèmes de résonance avec les autres machines et encore d'autres problèmes, peuvent être la cause directe des vibrations au niveau du moteur asynchrone.

Tab. 1.3. Classification des défauts magnétiques

<i>Type de défauts</i>	<i>Fréquences caractéristiques</i>	<i>Causes typiques</i>	
		<i>Variation d'entrefer</i>	<i>Variation de courant</i>
<i>Stationnaire</i>	$2 \times f_s$	Excentricité statique	<ul style="list-style-type: none"> - Déséquilibre de phases statoriques. - Spires en court-circuit. - Défaut d'isolement entre tôle
<i>Tournant</i>	f_r avec bandes latérales à $2 \times g f_s$	Excentricité dynamique	<ul style="list-style-type: none"> - Barres (ou portions d'anneaux de court-circuit) rompues ou fissurées. - Défaut de tôles rotoriques.

Tel que f_s désigne la fréquence statorique, f_r la fréquence rotorique.

Les vibrations dans les machines électriques peuvent être captées grâce à des accéléromètres (mesure de l'accélération de la vibration), des vélocimètres (mesure de la vitesse de la vibration), ou bien capteur de proximité (le déplacement relatif de l'arbre par rapport au capteur).

1.6.3 Diagnostic par analyse du couple

Lorsqu'une rupture de barre apparaît, les spectres fréquentiels de la vitesse rotorique et du couple électromagnétique laissent paraître des composantes supplémentaire situées aux fréquences $(2kgf_s)$. Ce-pendent, il s'est avéré que l'analyse de ces composantes ne nous renseigne pas aussi bien sur le défaut rotorique que celles présentes dans les spectres du courant statorique (augmentation des amplitudes moins significative). de plus, l'acquisition de ces deux signaux nécessite un équipement assez coûteux par rapport à un simple capteur de courant, ce qui limite leur utilisation pour le diagnostic de défauts des machines asynchrones. Certains systèmes reconstruisent une image du couple électromagnétique à partir des tensions et des courants mesures sur la machine, mais cette approche reste moins efficace que les méthodes précédemment citées [11].

1.7 Conclusion

Ce chapitre est essentiellement consacré à l'état de l'art de la génératrice asynchrone à rotor bobiné et sur les méthodes de diagnostic. Nous avons scindé ce chapitre en deux parties : la première concerne les composantes de la génératrice asynchrone à rotor bobinée, le principe de fonctionnement de la génératrice asynchrone et ses grandeurs électriques et mécaniques, la deuxième partie traite des défaillances qui permettent la mise en œuvre d'une procédure de diagnostic. Les techniques et autres outils de diagnostic étant très nombreux, nous les avons classées en deux approches : *(i) une approche système.* *(ii) une approche signal* basée sur le traitement de signal des grandeurs mesurables, à savoir le courant et la tension, parmi les méthodes « système » exposées ci-dessus, notre choix s'est porté pour l'analyse d'enveloppe en tant qu'outil de surveillance et de diagnostic. Celui-ci est justifié pour les raisons suivantes : la méthode est pratique à mettre en œuvre et elle est économe en temps de calcul.

Chapitre 2

Outils de traitement de signal pour le diagnostic par analyse du courant

2.1 Introduction

L'analyse harmonique ou fréquentielle est l'instrument majeur de la théorie des signaux et des systèmes. Le développement en séries de Fourier et plus généralement la transformation de Fourier permettent d'obtenir une représentation spectrale des signaux déterministes. celle-ci exprime la représentation de l'amplitude, de la phase, de l'énergie ou de la puissance des signaux considérés en fonctions de la fréquence [23].

Ce chapitre est une introduction aux représentations spectrales des signaux à l'aide de la transformée de Fourier, pour plus de détails, on peut consulter avantageusement le livre de B.P. Lathy [19].

2.2 Simulation et analyse d'un signal périodique

Le temps et la fréquence sont deux bases servant à la description des signaux. Ceux sont deux points de vue différents d'une même réalité ; ils sont complémentaires. Il est important de bien comprendre les relations qui existent entre les deux bases ; Une grandeur sinusoïdale est décrite par l'équation :

$$x(t) = X_{\max} \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (2.1)$$

Son évolution temporelle est contenue dans la fonction sinus ; dés, on sait que le signal $x(t)$ ondulé avec une forme précise fixée par la fonction. Cependant, des informations supplémentaires sont données : l'amplitude (X_{\max}), la phase (φ) et la fréquence (f_0). Ce sont ces informations qui sont fournies par la représentation fréquentielle ou spectrale.

2.2.1 Signal sinusoïdal

Un signal, qui est continu par nature, est appelé signal continu. La forme générale d'un signal sinusoïdal est [8] :

$$x(t) = A \sin(\omega t + \Phi) \quad (2.2)$$

Ici :

- A : l'amplitude du signal
- ω : Fréquence angulaire du signal (mesurée en radians)
- Φ : Angle de phase du signal (mesuré en radians)

La tendance de ce signal est de se répéter après une certaine période de temps, il est donc appelé signal périodique. La période de temps du signal est donnée par ;

$$\boxed{T = \frac{2\pi}{\omega}}$$

Soit le signal sinusoïdal $x_1(t)$ avec une fréquence fondamentale 1000 Hz donné par :

$$x_1(t) = 0,5 \sin(2\pi \cdot 1000 \cdot t) \quad (2.3)$$

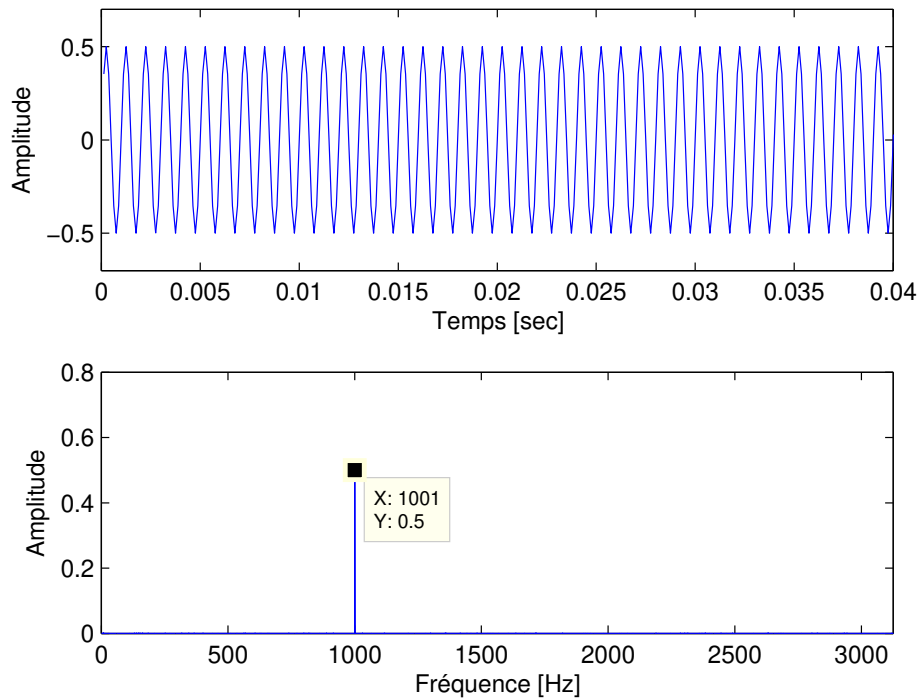


Fig. 2.1. Signal sinusoïdal et spectre correspondant.

On doit simuler ce signal sur MATLAB avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 8000$ Hz et un nombre d'échantillonnages 16000.

Faute de pouvoir représenter le signal en fonction du temps sous une forme facilement exploitable, on a recherché à le représenter dans un diagramme amplitudes/fréquences appelé spectre (parce qu'intemporel). Avec ce type de représentation, chacune des composantes sinusoïdales élémentaires constituant le signal est parfaitement définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale du signal en figure (2.1) devient ainsi plus claire et facilement exploitable [5].

Le spectre relatif à un signal sinusoïdal de période T présente une raie à la fréquence $F = 1/T$

2.2.2 Somme de signaux sinusoïdaux

La nature de la rotation étant périodique, tout signal périodique selon Fourier se décompose d'une somme de sinusoides que l'on appelle série de Fourier. Si « S » (S peut désigner l'accélération, la vitesse ou le déplacement) est une fonction périodique du temps, on peut écrire [15] :

$$S(t) = \sum S_n \cdot \sin(w_n \cdot t + \varphi) \quad (2.4)$$

le signal sinusoïdal $x_2(t)$ avec des fréquences fondamentales 1000 Hz, 2100 Hz et 2230 Hz donné par :

$$x_2(t) = 0.5 \sin(2\pi \cdot 1000 \cdot t) + 0.75 \sin(2\pi \cdot 2100 \cdot t) + 0.7 \sin(2\pi \cdot 2230 \cdot t) \quad (2.5)$$

Le résultat de la somme de deux signaux sinusoïdaux est montré dans la figure ci-dessous. La représentation du signal vibratoire ne permet pas l'analyse, car tous les termes

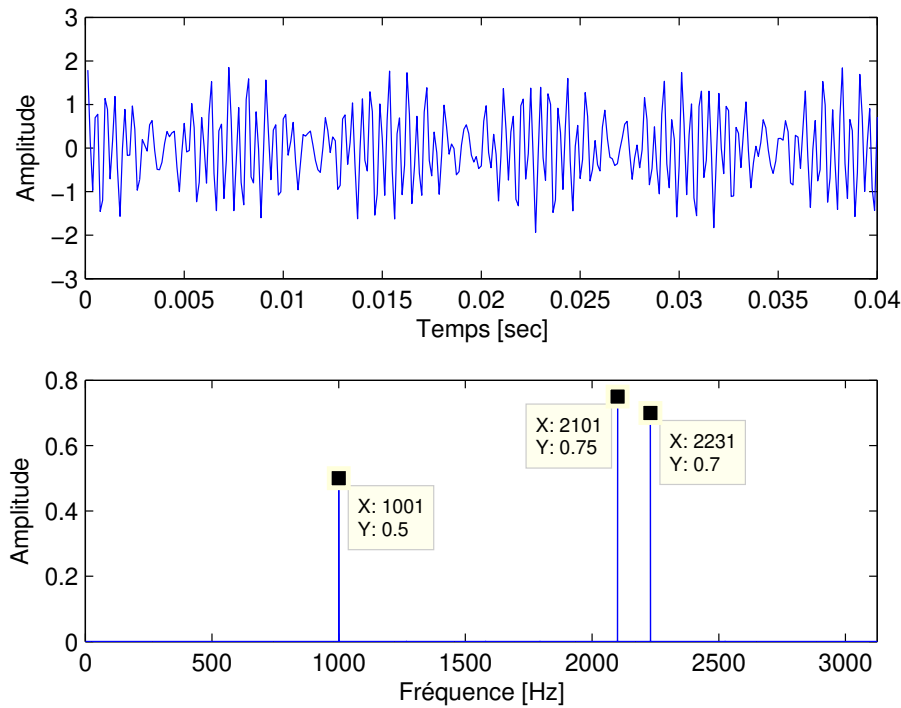


Fig. 2.2. Représentations temporelle et fréquentielle d'une somme de signaux sinusoïdaux.

sont superposés. On a donc besoin d'un outil mathématique supplémentaire. Si on applique la transformée de Fourier sur une fonction du temps comme l'accélération, la vitesse ou le déplacement, le résultat obtenu est une autre fonction en relation avec la fréquence. Cette nouvelle fonction est appelée spectre Figure (2.2).

La somme de plusieurs sinus compose le signal $x_2(t)$, son spectre est une succession de pic aux différentes fréquences caractéristiques du signal de départ.

2.3 Simulation et analyse d'un signal modulé

La modulation d'un signal utilise un signal sinusoïdal V_p de fréquence f_p , appelé onde porteuse, :

$$V_p = A \cdot \cos(\Omega \cdot t + \varphi) \text{ avec } f_p = \frac{\Omega}{2\pi} \quad (2.6)$$

Ce signal ou onde porteuse V_p est utilisé pour transmettre le signal « informatif » en modifiant l'une de ses caractéristiques, c'est-à-dire qu'un des paramètres de l'onde porteuse va varier au « rythme » du signal à transmettre.

Les trois possibilités de modification ou modulation sont donc :

- amplitude A du signal porteur : **modulation d'amplitude** (MA) ;
- fréquence f_p du signal porteur : **modulation de fréquence** (MF) ;
- phase φ du signal porteur : **modulation de phase**.

Il est à remarquer que la fréquence porteuse f_p est en général très supérieure à la plus haute fréquence f_M du signal à transmettre.

Ces trois types de modulations sont appelés « modulation finale » permettant de créer le signal directement émis par l'émetteur. De plus, il est possible dans certains cas d'associer deux types de modulation (par exemple la modulation d'amplitude et de phase).

La comparaison de ces différents modes de modulation et le choix de l'une de ces méthodes se font sur la base de nombreux critères (immunité aux bruits ou qualité de la transmission, facilité de réalisation, coût, etc...) [9].

2.3.1 Modulation d'amplitude

L'onde porteuse étant définie par $s_p(t) = A \cdot \cos(\Omega t + \varphi)$ et le signal modulant $s(t)$ à transmettre vérifiant la propriété $|s(t)|_{\max} \leq 1$, l'expression du signal modulé en amplitude $s_{OMA}(t)$ s'écrit sous la forme suivante :

$$s_{OMA}(t) = A \cdot [1 + m \cdot s(t)] \cdot \cos(\Omega \cdot t + \varphi) \quad (2.7)$$

où m est le taux de modulation (exprimé en pour-cent de la profondeur de modulation), nombre compris entre 0 et 1 tel que l'expression entre crochets soit toujours positive.

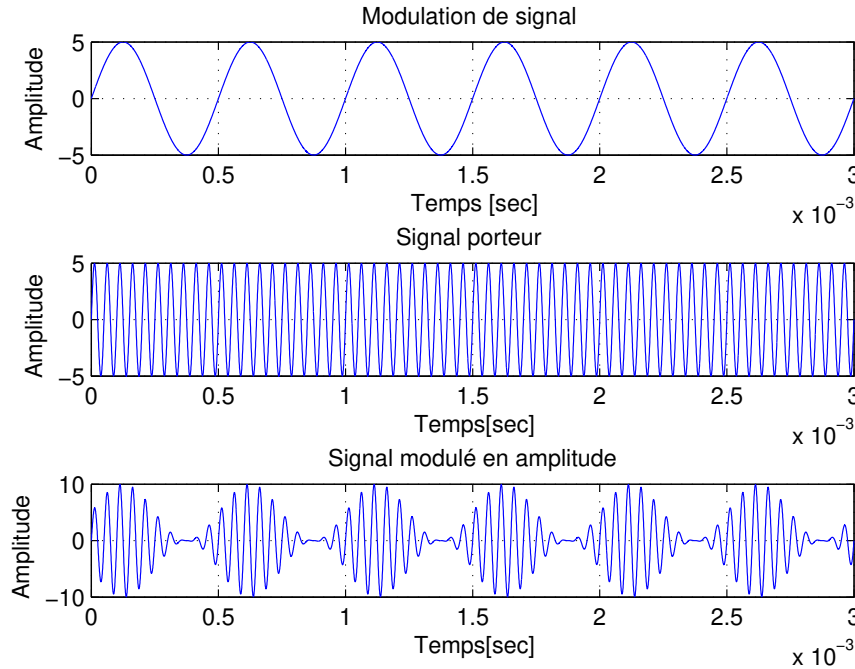


Fig. 2.3. Modulation d'amplitude.

Si on observe le signal modulé pendant une durée de plusieurs périodes de l'onde porteuse, on voit varier l'amplitude instantanée de cette onde en fonction du signal $s(t)$ (cf. Figure 2.3) [9].

2.3.2 Modulation de fréquence

Le principe théorique est la modulation de la fréquence d'un signal (dit « onde porteuse » dans le cas des télécommunications) par un signal de plus basse fréquence (signal modulant).

La relation mathématique représentant l'onde modulée s'écrit généralement :

$$s = s_0 \cdot \sin(2\pi f_p t + \beta \cdot \sin(2\pi f_m t)) \quad (2.8)$$

Cette expression, où β est appelé indice de modulation, se comprend en calculant la fréquence « instantanée » comme la dérivée temporelle de la phase ;

On obtient bien en effet la relation donnant la modulation de la fréquence de base par la fonction de fréquence $f_m^{(2)}$ [2].¹

$$f = f_p + f_m \cdot \beta \cdot \cos(2\pi f_m t) \quad (2.9)$$

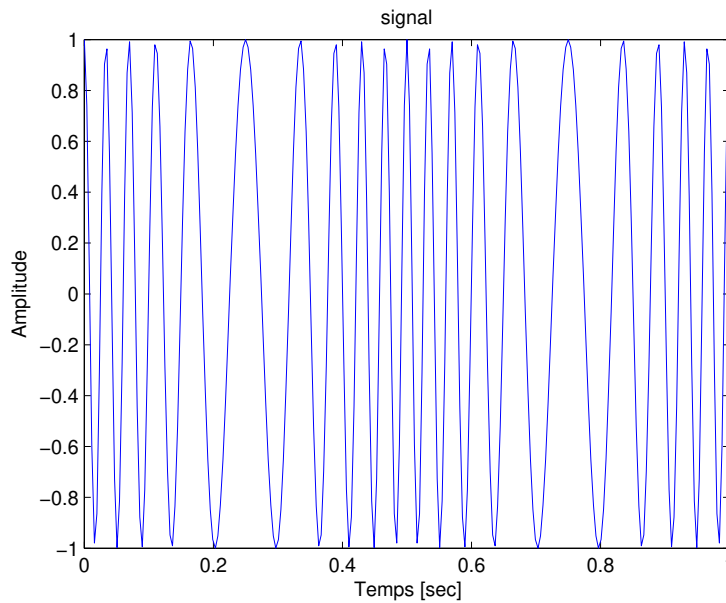


Fig. 2.4. Représentation temporelle de la modulation de fréquence.

Une telle relation peut être utilisée pour générer, non seulement, la fonction mathématique et son graphe, mais également un signal acoustique si les fréquences de la porteuse et de la modulante sont du domaine audible Figure (2.4).

¹Cette relation permet de relier l'indice de modulation à l'excursion temporelle en fréquence :
 $\beta = \Delta f / f_m$

2.4 Effet des paramètres d'échantillonnage

2.4.1 Fréquence d'échantillonnage

L'échantillonnage considéré ci-dessus est de type temporel. Cependant, les propriétés énoncées sont aussi applicables à un échantillonnage de type fréquentiel.

Pour numériser un signal, il faut le découper en échantillons (« samples » en anglais) de durée égale, T_e appelée période d'échantillonnage.

La fréquence d'échantillonnage correspond au nombre de mesures réalisées par seconde : $F_e = \frac{1}{T_e}$.

En calculons le spectre d'une fréquence d'échantillonnage $F_e = 8000$ Hz et 3000 Hz de période T ;

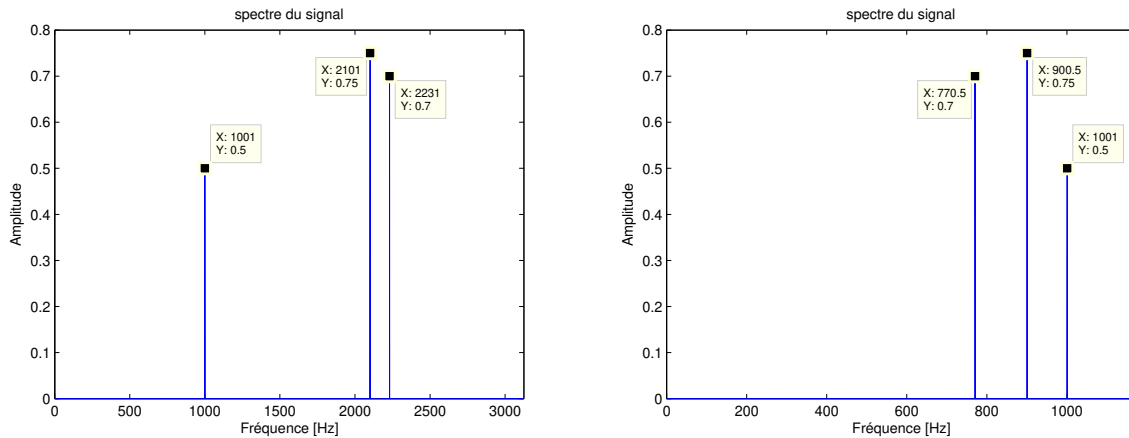


Fig. 2.5. Représentation fréquentielle de l'effet de fréquence d'échantillonnage.

Dans la Figure (2.5), on constate que la diminution de la fréquence d'échantillonnage a un effet sur les raies spectral, elles gardent les mêmes amplitudes à des fréquences différentes.

On peut en conclure que pour échantillonner correctement, il faut au minimum deux points de mesure par période, c'est-à-dire que la fréquence d'échantillonnage soit supérieure au double de la fréquence du signal :

$$f_e > 2f$$

2.4.2 Nombre d'échantillonnages

La première étape de la numérisation d'un signal concerne sa mise en forme et son échantillonnage, c'est-à-dire la façon dont le signal, continu dans le temps, est découpé en un ensemble discret de valeurs. Le premier paramètre à déterminer est le nombre d'échantillons qu'il va falloir prélever pour représenter correctement le signal [22].

Dans ce cas-là, en calculons le spectre d'une fréquence d'échantillonnage $F_e = 8000$ Hz et de période nombre d'échantillonnages $N=100$.

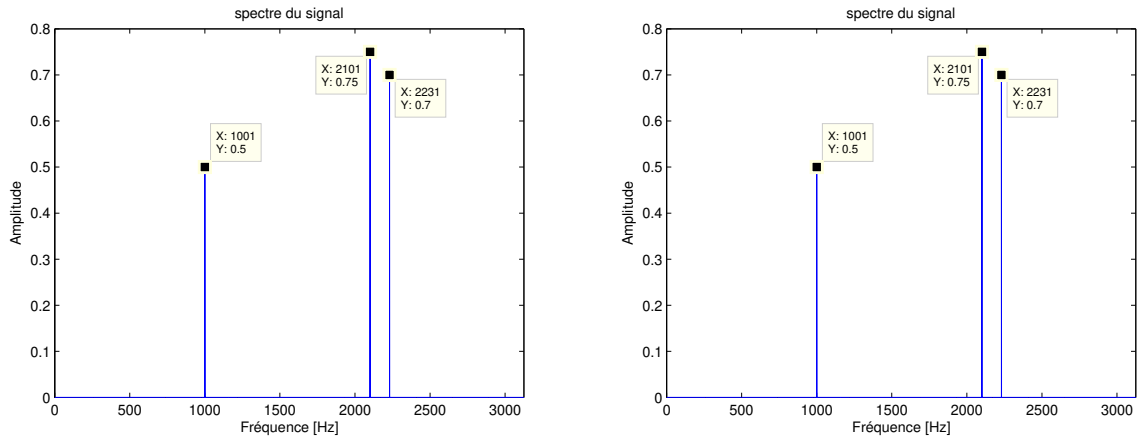


Fig. 2.6. Représentation fréquentielle de l'effet de nombre d'échantillonnages.

Les spectres de la Figure (2.6) d'un signal périodique échantillonné à la fréquence $F_e = 8000$ Hz et de nombre d'échantillonnages $N = 100$ comprend :

- Des raies spectrales et correspondent au fondamental et aux harmoniques du signal.
- Le nombre d'échantillonnages n'a aucuns effets sur les spectres, il n'y a pas de changement de la fréquence d'échantillonnage.
- pour avoir la meilleure précision du spectre, il faut augmenter le nombre d'échantillonnages.

2.5 Application d'analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure. En effet, les défauts de roulement de type choc excitent les hautes fréquences des structures, ainsi un phénomène démodulation se produit entre la fréquence de défaut (basse fréquence) et la résonance déstructure (haute fréquence). Après avoir démodulé le signal, le spectre d'enveloppe fera mieux apparaître les raies d'impulsions dues au défaut. En pratique, pour obtenir le spectre du signal enveloppe, il faut suivre les étapes suivantes :

- Déterminer les fréquences de résonance.
- Filtrer avec un filtre passe bande le signal temporel autour des fréquences de résonance.
- Calculer le signal d'enveloppe à l'aide de la transformée de Hilbert.
- Calculer le spectre d'enveloppe à l'aide de la transformée de Fourier [16].

La technique la plus utilisée dans le domaine de recherche des défauts se base sur la transformée de Hilbert (TH).

La TH peut déterminer l'amplitude instantanée et la fréquence instantanée selon l'expression donnée par [12] :²

² TH signifie transformée de Hilbert.

$$z(t) = x(t) + iy(t) = x(t) + i\mathcal{H}[x(t)] = A(t)e^{i\varphi(t)} \quad (2.10)$$

où $i\mathcal{H}[x(t)]$ est la transformée de Hilbert de $x(t)$, $A(t)$ est l'amplitude instantanée (enveloppe, magnitude) et $\varphi(t)$ est la phase instantanée.

Un exemple de simulation est donné par la formule $s_2(t)$. Ce signal est constitué d'une autour de la fréquence porteuse de 1800 Hz, Ce signal est présenté sur la Figure (2.7.A).

$$s_2(t) = (0.5 * \sin(2\pi 1800 * t)) * e^{(-900 * \text{mod} \times (t, \frac{1}{103}))} \quad (2.11)$$

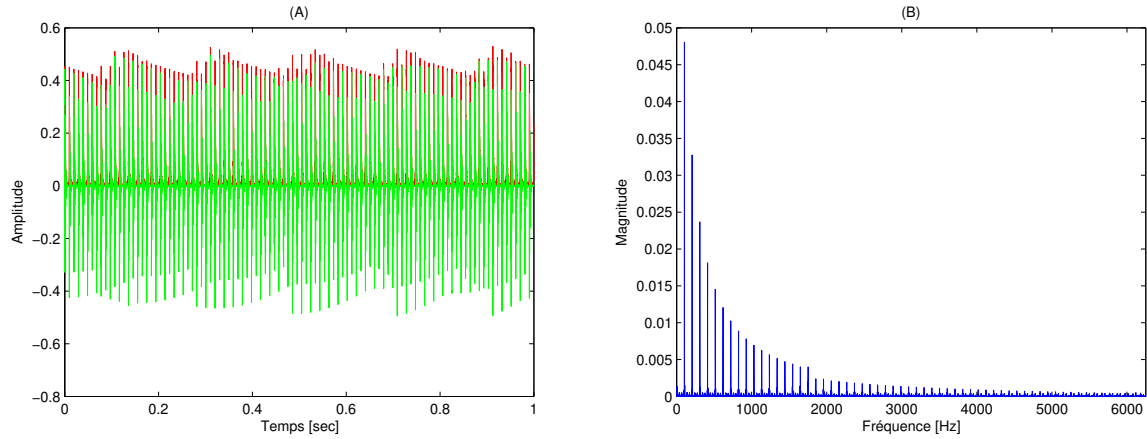


Fig. 2.7. (A) le signal simulé $s_2(t)$, et (B) spectre de son enveloppe.

Comme nous pouvons le constater, le spectre du signal $s_2(t)$ donné par la Figure (2.6. B) montre des bandes latérales de fréquences autour de la fréquence 1800 Hz. Pour déterminer les fréquences de défaut, le signal est démodulé en utilisant l'analyse d'enveloppe.

2.5.1 Signal modulé en amplitude

Il est fréquent en télécommunication de devoir émettre des signaux dont le spectre a été préalablement déplacé dans un domaine de fréquences permettant la transmission des messages par ondes électromagnétiques, une des possibilités consiste à moduler l'amplitude de la porteuse $p(t)$ à l'aide du message $m(t)$. La modulation d'amplitude est généralement obtenue la multiplication des deux signaux entre eux Figure (2.8) [27].

$$x(t) = m(t) \cdot p(t) \quad (2.12)$$

Sur les machines tournantes, bien de défauts se traduisent par une modulation de l'amplitude du signal vibratoire (engrènement, roulements, etc...). dans ce cas un exemple de simulation est donné par la formule $x3(t)$:

$$x3(t) = \cos(2\pi * 60 * t) (1 + 0.85 * \cos(2\pi * 7.2 * t)) \quad (2.13)$$

Le spectre présente un pic à la fréquence 60 Hz modulée (porteuse) avec des raies latérales espacées de la fréquence de modulation.

On retrouve sur le spectre moyen et le diagramme spectre-temps la *porteuse* à et les *2 raies latérales* :

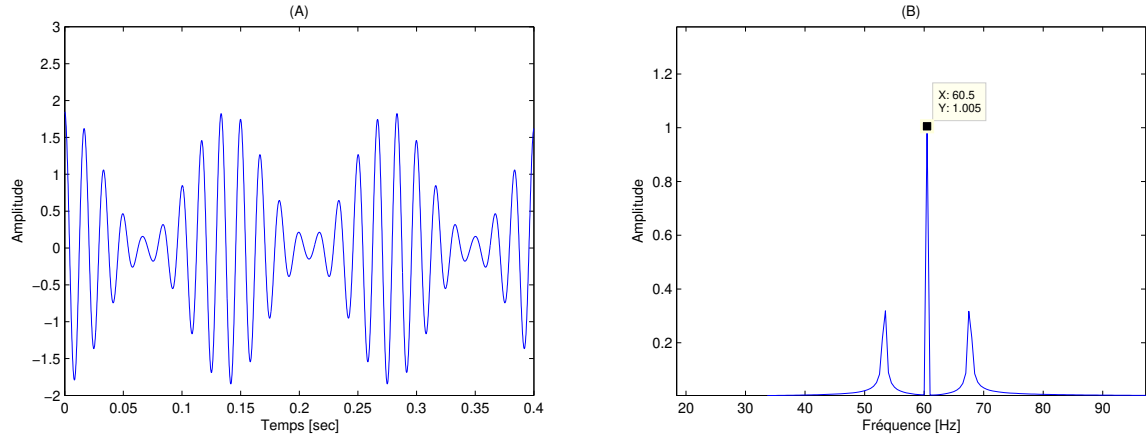


Fig. 2.8. (A) Signal son modulé en amplitude, et (B) Spectre correspondant.

- L'oscillogramme montre que le signal est stable dans le temps.
- Le diagramme spectre-temps montre que le spectre ne change pas lorsque le temps s'écoule
- Le spectre FFT du signal est donc suffisant pour connaître les propriétés fréquentielles du signal

2.5.2 Signal modulé en fréquence

Le calcul du spectre de Fourier d'un signal défini par la relation (2.12) présente quelques difficultés mathématiques; celui-ci conduit en effet à des fonctions intégrales : les fonctions de Bessel (notées $J_k(x)$). De façon plus précise, le spectre est donné par le développement [2] :

$$\begin{aligned} \sin(2\pi f_p t + \beta \cdot \sin(2\pi f_m t)) = & J_0(\beta) \cdot \sin(2\pi f_p t) + \\ & J_1(\beta) \cdot \sin(2\pi f_p t + 2\pi f_m t) - J_1(\beta) \cdot \sin(2\pi f_p t - 2\pi f_m t) + \\ & J_2(\beta) \cdot \sin(2\pi f_p t + 4\pi f_m t) - J_2(\beta) \cdot \sin(2\pi f_p t - 4\pi f_m t) + \\ & J_3(\beta) \cdot \sin(2\pi f_p t + 6\pi f_m t) - J_3(\beta) \cdot \sin(2\pi f_p t - 6\pi f_m t) + \dots \end{aligned} \quad (2.14)$$

Soit, sous forme d'un Tableau (2.1) de « coefficients d'amplitude » :

Tab. 2.1. Coefficients d'amplitude

Fréquence ($k = 0, 1, \dots$)	Amplitude
$f_p + k \cdot f_m$	$J_k(\beta)$
$f_p - k \cdot f_m$	$(-1)^k \cdot J_k(\beta)$

la simulation d'un signal modulé en fréquence par la formule de x4 donne :

$$x4(t) = \sin(2000\pi * t + 3 * \sin(200\pi * t)) \quad (2.15)$$

Le spectre Figure (2.9 B) d'un signal FM est complexe et ne se calcule que dans le cas particulier où le signal basse-fréquence est sinusoïdal.

On obtient donc un spectre centré sur la fréquence de la porteuse et comportant des composantes espacées d'une valeur égale à la fréquence modulante. Mais il convient de faire deux remarques Figure (2.9) [2].

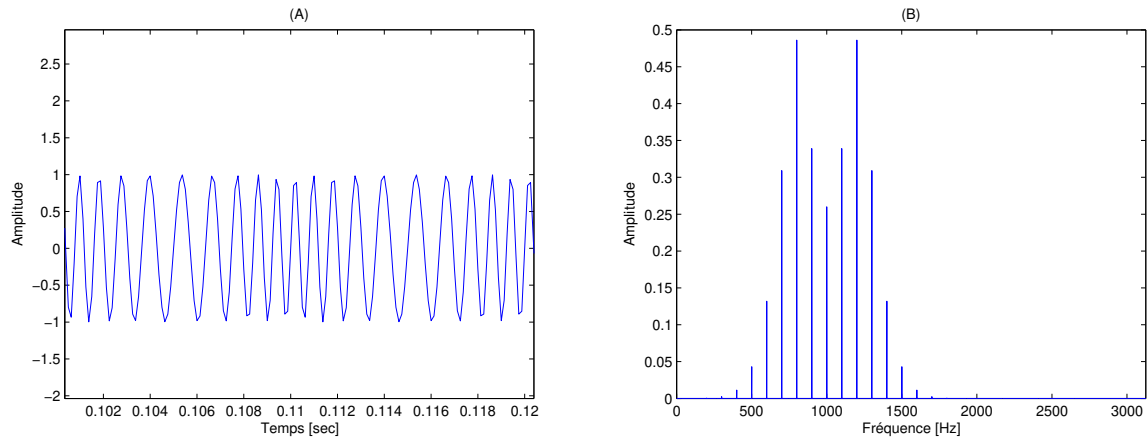


Fig. 2.9. (A) Signal son modulé en fréquence "forme d'onde" (B) Spectre correspondant.

- La première concerne l'étendue du spectre qui, contrairement à la modulation d'amplitude, n'est pas limité : le nombre des fréquences latérales (inférieures et supérieures) est infini.
- La seconde remarque concerne les amplitudes relatives : l'importance de la fréquence centrale (celle de la porteuse) dépend fortement de l'indice de modulation.

2.6 Conclusion

Dans cette partie de ce travail dédié aux Outils de traitement de signal pour le diagnostic par analyse du courant, nous nous sommes attachés à la simulation des algorithmes avec un souci de simplicité de réglage et de facilité d'interprétation des paramètres basée sur l'analyse et la transformée de Fourier (FFT). Pour cela, nous nous sommes focalisés sur deux méthodes de détection de défauts, l'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe. Cette étude menée sur des exemples de simulation nous a permis d'exposer clairement les avantages et les limitations de chaque méthode considérée dans ce travail, afin de suivre l'état des composantes d'un système.

La simulation de plusieurs signaux qui reflètent les défauts de certains organes ont été traité par des méthodes de traitement de signal tel que l'analyse spectrale basée sur la transformée de fourrier, l'analyse d'enveloppe basée sur la transformée de Hilbert qui permet de résoudre le problème de modulation d'amplitude, surtout concernant les mesures du courant électrique.

Chapitre 3

Diagnostic d'un défaut de déséquilibre au rotor d'une génératrice éolienne

3.1 Introduction

Les défauts qui apparaissent dans les machines électriques ont des causes variées. Le court-circuit statorique et/ou rotorique dans les moteurs/générateurs a fait l'objet de nombreux travaux. Les machines électriques, particulièrement la génératrice asynchrone (GAs) à rotor bobiné, jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. L'assurance de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement de celles-ci sont fondamentales. Il est donc nécessaire de développer des systèmes, permettant de surveiller et de diagnostiquer l'état de santé de ces dispositifs.

Récemment, la méthode d'analyse de signature du courant statorique d'une machine électrique (ACSM) sous l'abréviation anglaise MCSA (Motor Current Signature Analysis) est largement utilisée.

Dans ce chapitre, nous allons essayer d'exploiter les résultats expérimentaux mesurés sur une génératrice asynchrone (GAs) dans différentes conditions (saine et défectueuse), ayant pour objectif d'apporter un bon diagnostic de celle-ci en utilisant la méthode de MCSA.

3.2 Description du banc d'essai étudié

Les figures ci-dessous montrent un banc d'essai d'une génératrice asynchrone à rotor bobinée. Afin de suivre l'évolution des défauts électriques rotoriques d'un générateur asynchrone, tels que l'usure des balais ou des bagues collectrices, deux niveaux de défauts ont été implémentés sur le banc d'essai en ajoutant successivement deux résistances externes supplémentaires de $0,3\Omega$ et $0,6\Omega$, respectivement, à la phase 1 du circuit du rotor via le banc de charge externe. Les niveaux correspondants d'asymétrie électrique du rotor, exprimés en pourcentage de la résistance de phase équilibrée du rotor, étaient de 21% et 43%, respectivement. Les données ont été recueillies à des vitesses en régime permanent, allant de 1520 à 1600 tr/min. Dans chaque essai à vitesse constante, la GAs a été entraînée pendant 300 secondes. Les essais de la machine à vitesse variable ont été effectués selon des profils de vitesse dérivés d'un modèle d'une éolienne à vitesse variable de 2MW [32].



Fig. 3.1. Banc d'essai d'une génératrice éolienne dédié pour le diagnostic des défauts [32].

Les tensions et les courants aux bornes du stator du générateur triphasé sont mesurés à l'aide de cartes de transducteurs avec une bande passante de DC-100 KHz. Un capteur de couple Magtrol TMB 313/431, capable de délivrer 60 impulsions par tour, est utilisé pour mesurer le couple d'arbre, mais aussi comme tachymètre d'impulsion d'arbre. L'acquisition du signal est réalisée à l'aide d'une carte d'acquisition de données NI 6015 à une fréquence de 5 kHz. La carte est à son tour connectée via une connexion de bus série universel (USB) blindé à l'environnement NI LabVIEW qui fonctionne également comme environnement de contrôle du banc d'essai [32]. Un seul signal est considéré dans notre étude qui est le courant de ligne afin de l'analyser attentivement.

Le schéma de la Figure (3.2) représente la génératrice entraînée au le moteur à courant continu avec différentes vitesses : 1520, 1525, 1540, 1553, 1585 et 1600 tr/min. Le défaut de déséquilibre entre les phases rotoriques est représenté par une résistance rajoutée à l'une des phases du rotor de la génératrice.

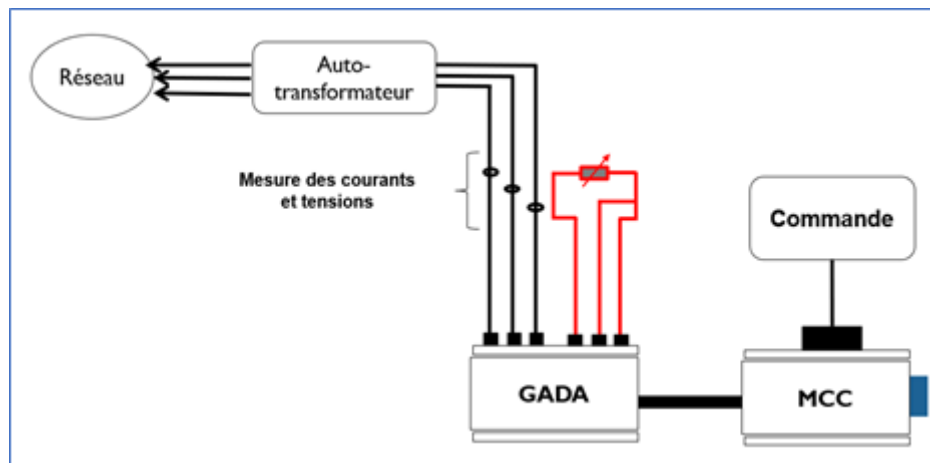


Fig. 3.2. Schéma représentatif du banc d'essai pour diagnostic des défauts d'une génératrice éolienne.

Pour chacune des vitesses, les essais sont effectués avec trois cas différents :

1. Le rotor de la machine n'est pas déséquilibré (0%) ;
2. Le rotor de la machine est déséquilibré à (21%) en ajoutant une résistance de $0,3\Omega$ à une phase rotorique ;
3. Le rotor de la machine est déséquilibré à (43%) en ajoutant une résistance de $0,6\Omega$ à une phase rotorique.

3.3 Analyse des mesures du courant statorique sur la génératrice

Les analyses des mesures du courant statorique permettent la compréhension du fonctionnement sain et défectueux du système étudié. L'analyse spectrale peut être un outil qu'elle se base d'échantillonner le signal à analyser et de calculer les points du spectre à l'aide d'un algorithme de calcul qui est en général une FFT (Fast Fourier Transformation). L'objectif de représenter les spectres dans des conditions différentes afin d'avoir une information sur l'état du système étudié. En plus, un autre outil qui l'analyse d'enveloppe

est utilisé pour comparer entre les signaux. Le spectre d'enveloppe est formé en effectuant une FFT de l'enveloppe du signal temporel. Ceci est souvent utilisé lorsque le signal a un contenu de bruit élevé comme les signaux vibratoires. Notre objectif dans cette étude est de représenter les deux spectres afin d'avoir des informations sur l'état de la GAs.

Les étapes de la réalisation d'un banc d'essai d'une génératrice asynchrone à rotor bobinée qui ont été suivies sont les suivantes :

- Application d'un défaut de déséquilibre au rotor d'une graduation en réglant le courant de ligne du moteur à la valeur nominale à l'aide des résistances branchées avec la génératrice.
- Mesure du courant d'une phase à travers le capteur de courant en enregistrant des valeurs mesurées via une carte d'acquisition de données connectée à un micro-ordinateur. Ces mesures se font pour le moteur sain et pour chaque degré de sévérité du défaut.
- Analyse des données mesurées par les outils de traitement du signal sous l'environnement **MATLAB/Simulink** afin d'étudier le comportement de la génératrice asynchrone en fonctionnement sain et en fonctionnement défaillant.

Les tests sont effectués d'une génératrice entraînée avec un moteur à courant continu sous différentes vitesses : 1520, 1525, 1540, 1553, 1585 et 1600 tr/min. L'acquisition a été réalisée en régime permanent avec une fréquence d'échantillonnage de 5 KHz et une durée de temps (durée d'acquisition) de 300 (sec). Dans ces conditions, la résolution spectrale (Δf) est de 0.003 Hz.

Le type de défaut que nous étudions est le déséquilibre pour différents pourcentages (21% et 43%). Donc, le programme s'adaptera pour nous donner l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut et les deux spectres à analyser (spectre du courant et le spectre d'enveloppe).

Nous savons que la présence d'un défaut fait apparaître des composantes additionnelles dans le spectre fréquentiel des grandeurs temporelles analysées comme le courant statorique. Par conséquent, une comparaison entre les spectres obtenus avec un rotor sain et un rotor défaillant nous permettra de mieux discerner les composantes créées par le défaut à étudier. L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus utilisée car le spectre résultant contient une source d'informations sur la majorité des défauts électriques et mécaniques pouvant apparaître au sein d'une GAs.

Le courant électrique instantané d'une phase statorique de la GAs est représenté dans la Figure (3.3) sous différentes conditions (saine et défectueuse). La Figure (3.4) montre le spectre du courant statorique : l'une saine et les deux autres défectueuses avec une 21% et 43% du déséquilibre.

D'après [13] et autres des fréquences caractéristiques apparaissent dans le spectre qui ont la formule suivante :

$$f_c = (1 \pm 2kg) f_s \quad (3.1)$$

En outre, d'autres séries d'harmoniques dus au défaut de l'excentricité mixte sont existés tout au long du spectre qui ont la formule suivante [3].

$$f_{E-Mix} = (f_s \pm k f_r) \quad (3.2)$$

Tel que : $f_r = (1 - s) f_s / p$ Est la fréquence mécanique du rotor, p est le nombre de paires de pôles.

Tel que k est un entier positif est égal à 1, 2, 3, etc.

Le contenu spectral du courant statorique Figure (3.4) ne se limite pas seulement à la composante fondamentale de fréquence 50 Hz. En effet, d'autres harmoniques contribuent à augmenter la richesse harmonique de ce signal. Nous pouvons remarquer la présence de plusieurs composantes dont les fréquences sont bien connues à ce jour comme $(1 \pm 2kg) f_s$ et $(f_s \pm k f_r)$.

L'évolution de l'amplitude du courant statorique en fonction du temps est indiquée sur la Figure (3.1). Il est clair que l'influence du degré de sévérité du défaut, se traduit par une déformation du courant. Une superposition du spectre de trois phases lorsque le rotor est soumis aux différentes conditions est présentée dans la Figure (3.2), avec :

- (A) sans défaut ;
- (B) déséquilibré de 21% ;
- (C) déséquilibré 43%.

3.3.1 Analyse du courant statorique lors d'entraînement à 1520 tr/min

La transformation de Fourier nous permet d'avoir les spectres des courants statoriques lors de l'entraînement à 1520 tr/min, comme le montre les Figures (3.3 et 3.4). Les fréquences dues au déséquilibre rotorique sont clairement apparues autour de la fréquence fondamentale du courant ($f_s = 50$ Hz) espacées de $(2g f_s)$. On dit que ces raies forment une bande latérale autour de la fréquence fondamentale du courant.

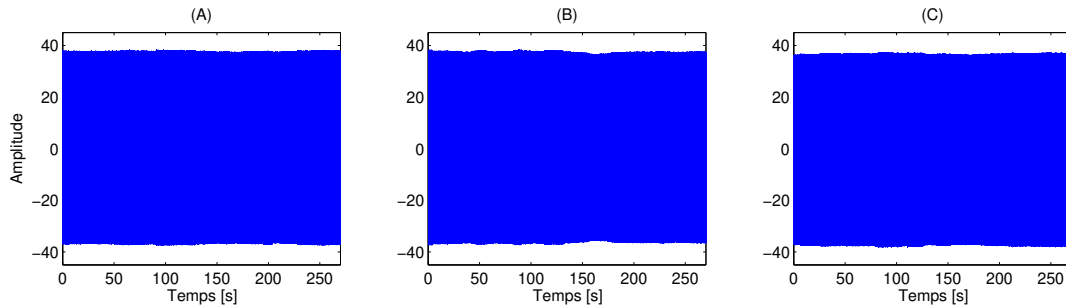


Fig. 3.3. Représentation temporelle des mesures du courant statorique de la génératrice lors de l'entraînement à 1520 tr/min avec rotor : (A) sans défaut, (B) déséquilibré à 21% et (C) déséquilibré à 43%.

Le calcul du spectre d'enveloppe du courant statorique a permis une démodulation des signaux du courant et l'isolation de la composante de défaut ($2g f_s$) comme le montre la Figure (3.5). Comme nous pouvons aussi constater l'augmentation de l'amplitude à cette fréquence spécifique quand le défaut de déséquilibre s'aggrave.

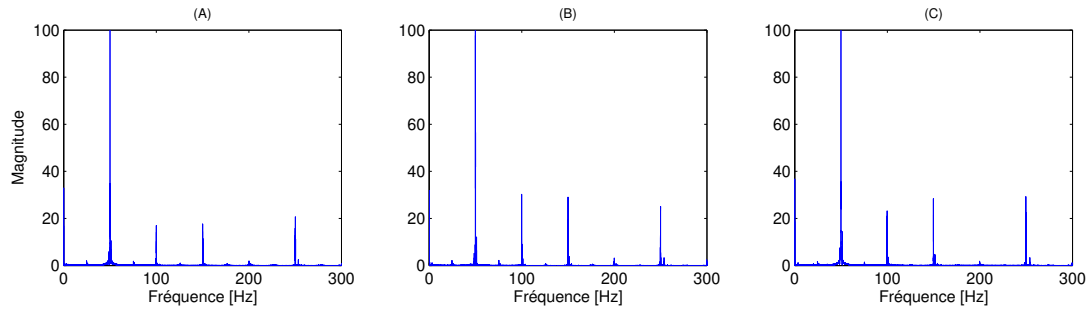


Fig. 3.4. Spectres des courants statoriques lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré à 21% et (C) déséquilibré à 43%.

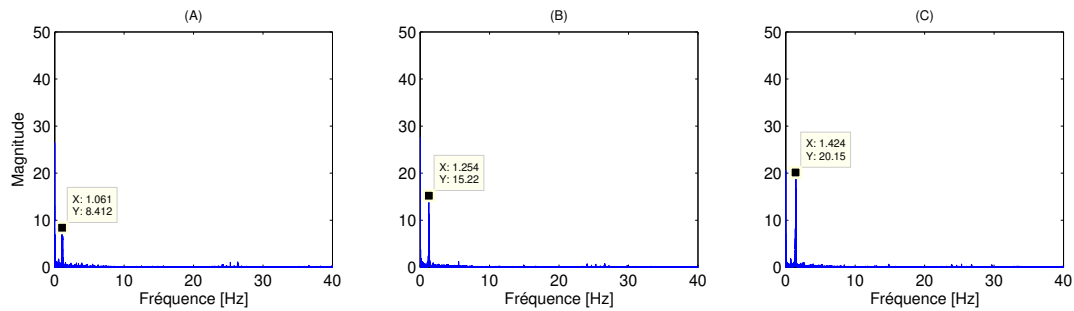


Fig. 3.5. Spectres d'enveloppes des courants statoriques lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré à 21% et (C) déséquilibré à 43%.

3.3.2 Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1525 tr/min

Lors de l'entraînement à 1525 tr/min, les mesures du courant instantané pour différents cas de défaut sont traitées. La Figure (3.6) représente les courants de phases en fonction du temps de chaque condition.

Les spectres dans la figure (3.7) montrent clairement l'évolution d'amplitude d'harmoniques en se basant sur le spectre.

Comme la montre la figure (3.8), le spectre d'enveloppe donne des informations importantes sur l'évolution d'amplitude de la fréquence 1.5 Hz.

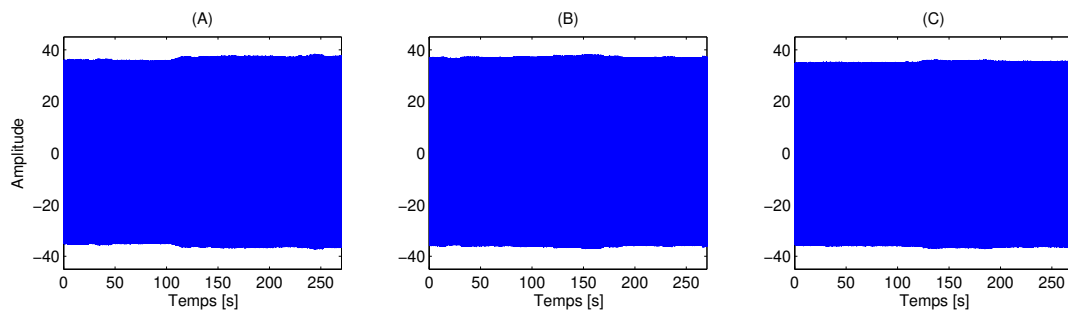


Fig. 3.6. Représentation temporelle des mesures du courant statorique de la génératrice lors de l'entraînement à 1525 tr/min : (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

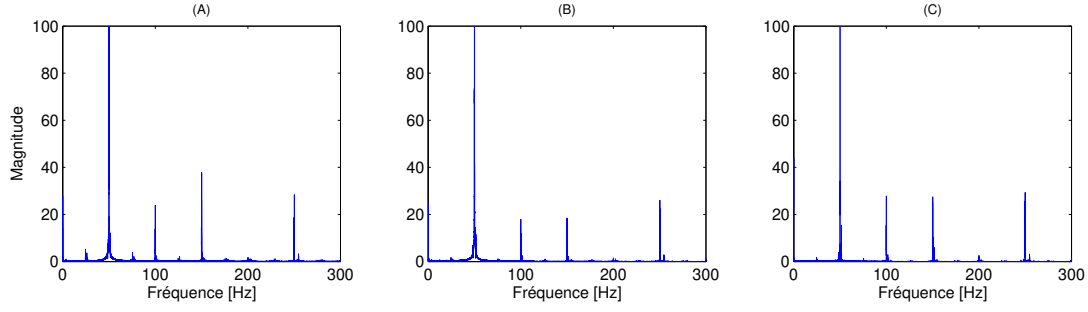


Fig. 3.7. Spectres du courant statorique lorsque le rotor est : (A) déséquilibré, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré de 43%

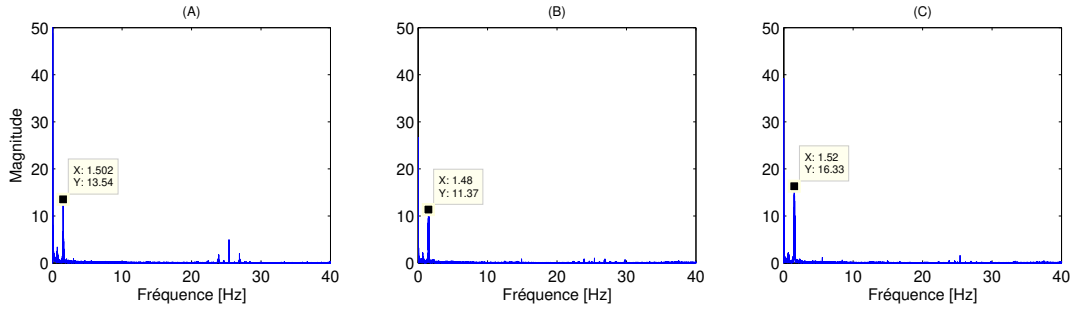


Fig. 3.8. Spectres d'enveloppes des courant statorique en subissant de transformation de Hilbert lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

3.3.3 Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1540 tr/min

Cette vitesse impose un glissement de valeur 0.026. Cela influe directement sur les valeurs d'harmoniques dus à l'excentricité mixte. Les deux harmoniques de l'excentricité mixte autour de la fréquence fondamentale 50 Hz ont les valeurs 25.66 Hz et 74.33 Hz qui correspondent $(f_s - f_r)$ et $(f_s + f_r)$ respectivement.

La valeur de la fréquence rotorique a été calculé par la formule suivante :

$$f_r = (1 - g) / p \quad (3.3)$$

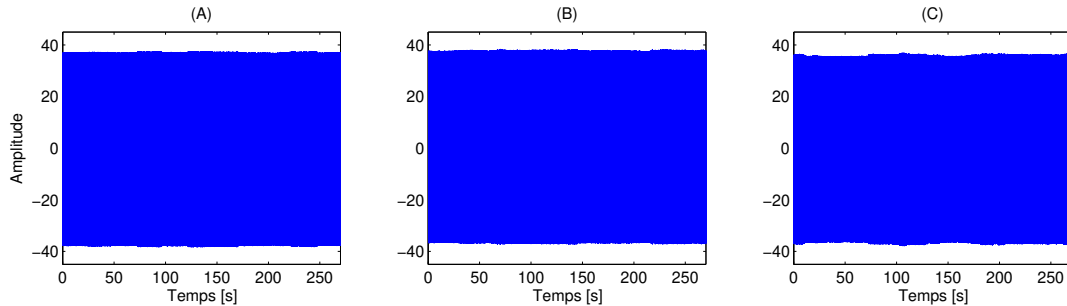


Fig. 3.9. L'amplitude du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

Le spectre d'enveloppe assure une évolution au niveau d'amplitude de quelques harmoniques comme l'harmonique de la valeur 2.5 Hz.

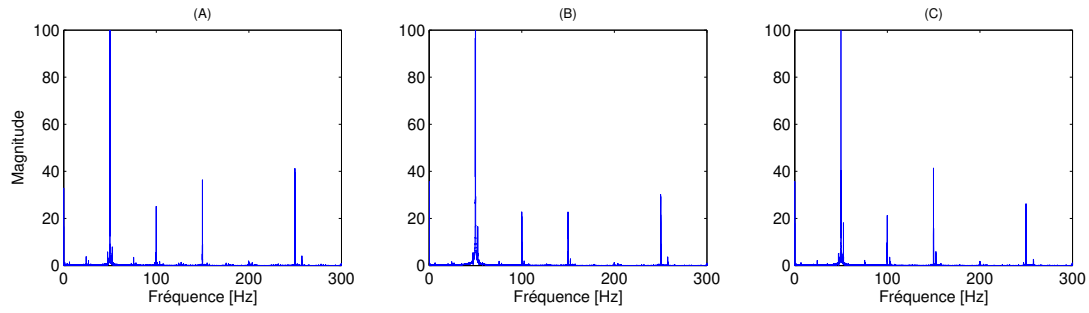


Fig. 3.10. Spectres du courant statorique lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

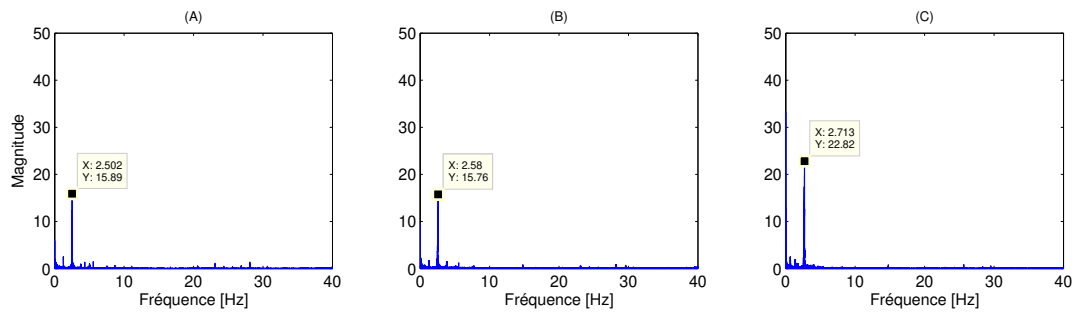


Fig. 3.11. Spectres d'enveloppes des courant statorique en subissant de transformation de Hilbert lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

3.3.4 Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1553 tr/min

On analyse les spectres afin d'avoir des informations sur l'état de la GAS. Sous une vitesse de 1553 tr/min, l'évolution d'amplitudes apparaissent clairement dans les deux spectres. Le spectre du courant statorique Figure (3.13) montre le déplacement de quelques harmoniques à cause du changement du glissement. En plus, le spectre d'enveloppe dans la Figure (3.14) montre clairement le suivi d'amplitude de $3.5Hz$ dans différentes conditions de la GAS.

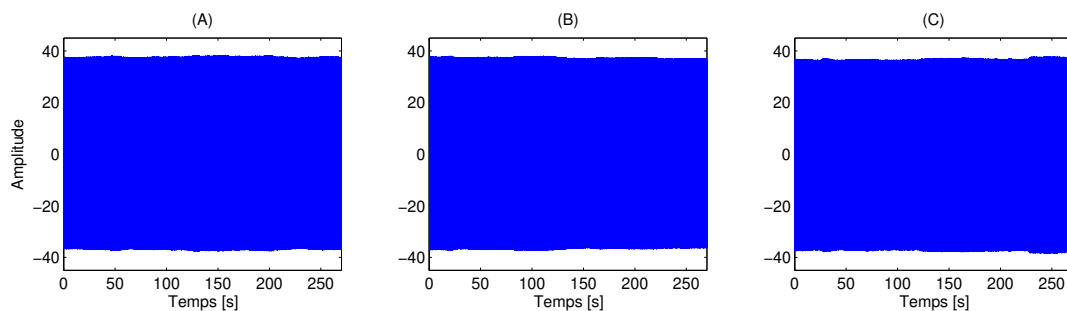


Fig. 3.12. L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

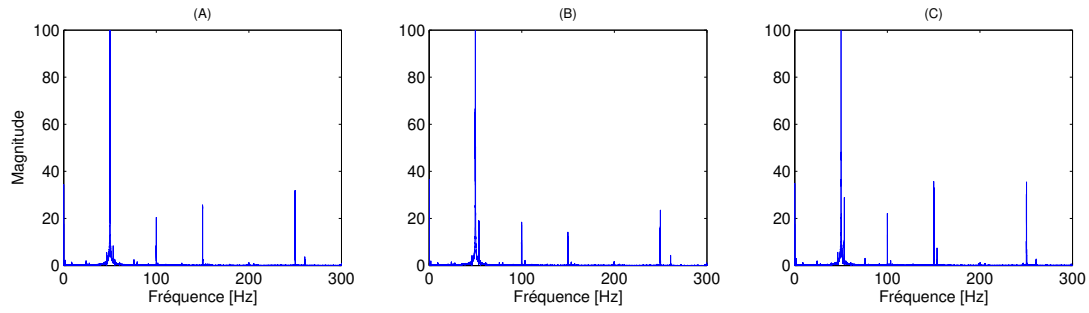


Fig. 3.13. L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

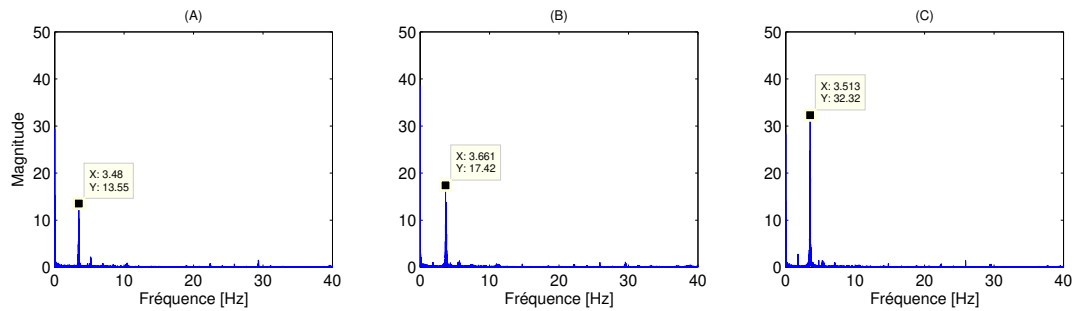


Fig. 3.14. L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

3.3.5 Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1585 tr/min

Comme la vitesse de rotation exige une valeur du glissement correspond à une vitesse bien précise, l'évolution des courant ont une grande partie de cette variation. En plus, et afin de suivre cette évolution le spectre du courant statorique et le spectre d'enveloppe permettent clairement de consulter cette évolution. Sous fonctionnement de la Gas à une vitesse de 1585 tr/min, les courants ont une influence remarquable au niveau d'amplitude. D'autre part, les défauts créés (21% et 43% du déséquilibre) ont été détecté clairement par un changement d'amplitude.

Les Figures ci-dessous montrent clairement ces évolutions pour différent cas.

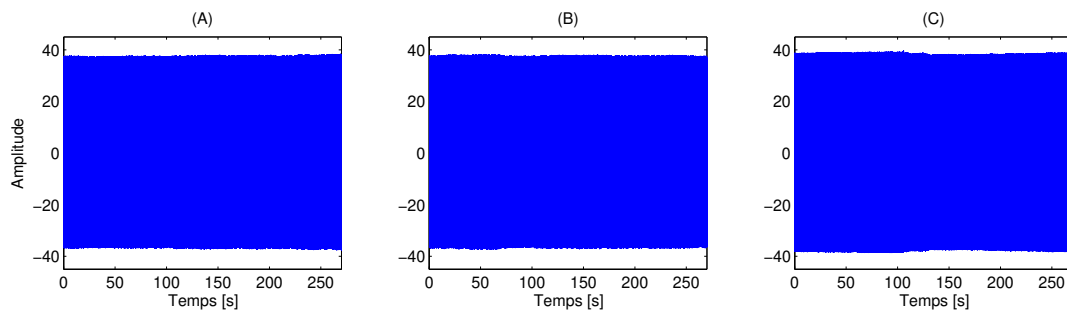


Fig. 3.15. L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

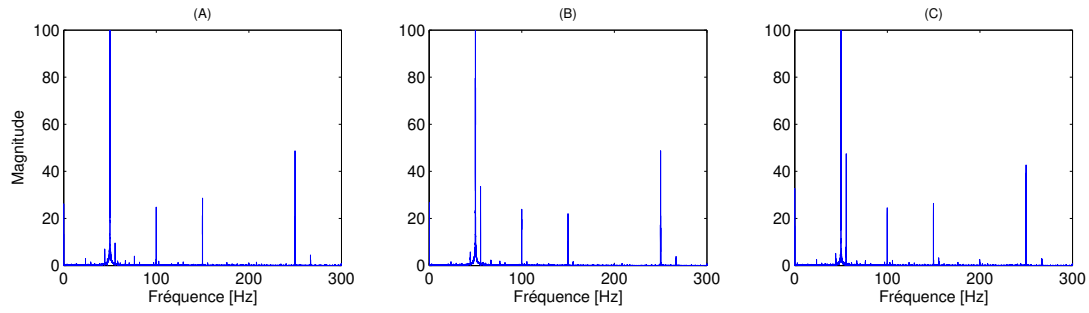


Fig. 3.16. Spectres du courant statorique lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

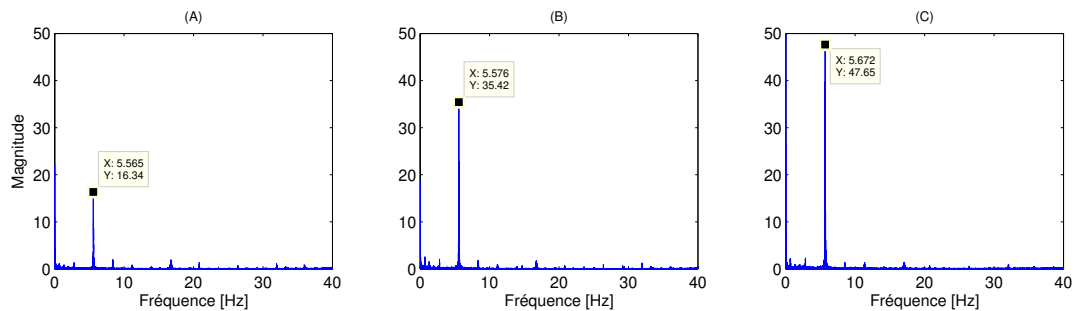


Fig. 3.17. Spectres d'enveloppes des courant statorique en subissant de transformation de Hilbert lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

3.3.6 Analyse des mesures du courant statorique à une vitesse 1600 tr/min

La charge exercée sur la génératrice exige une valeur du glissement bien définie. Sous une vitesse de 1600 tr/min, les courants ont influence au niveau d'amplitude. En plus, et sous différents pourcentages de déséquilibre, les courants seront une variation au niveau du contenu spectral.

Le spectre du courant statorique présenté dans la Figure (3.19) montre un déplacement de quelques harmoniques comme les harmoniques dus à l'excentricité mixte.

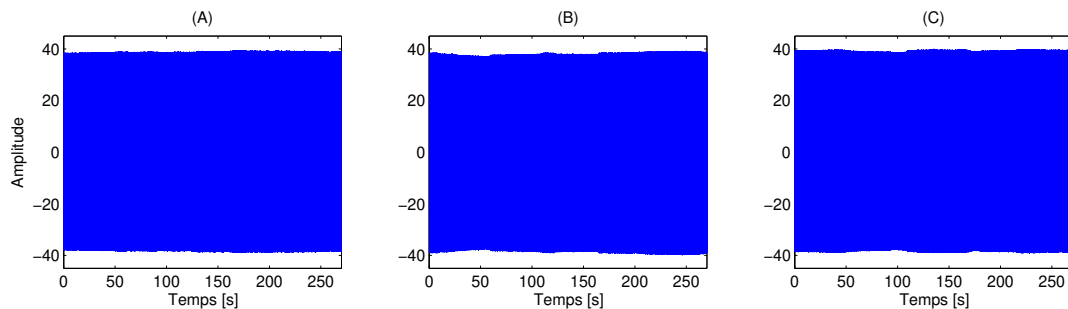


Fig. 3.18. L'amplitudes du courant statorique en fonction du temps ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

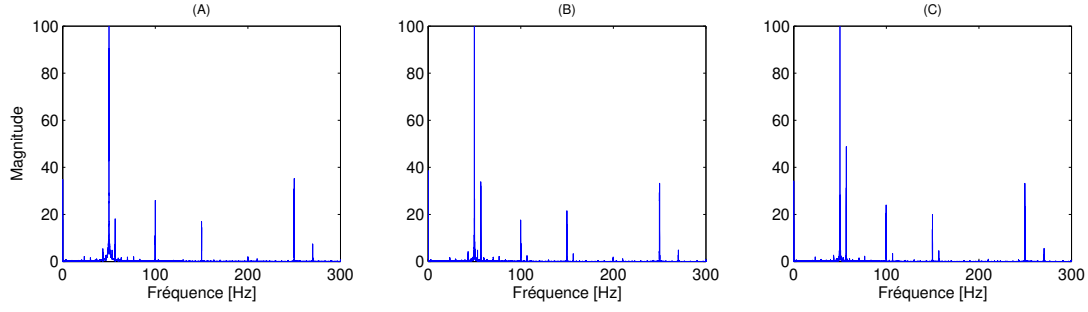


Fig. 3.19. Spectres du courant statorique lorsque le rotor est : (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

D'autres harmoniques ont une variation remarquable comme les fréquences multiples de 100 Hz. Le spectre d'enveloppe dans la Figure (3.20) montre un suivi d'amplitude de la fréquence 6.65 Hz. En fonction du déséquilibre, les fréquences ont un changement clair d'amplitude.

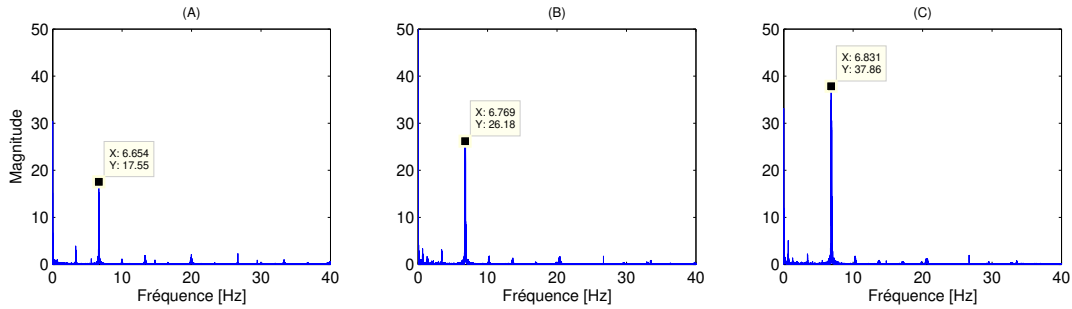


Fig. 3.20. Spectres d'enveloppes des courant statorique lorsque le rotor est ; (A) sans défaut, (B) déséquilibré de 21% et (C) déséquilibré 43%

On peut considérer les harmoniques qui ont été suivis dans cette partie comme un indicateur important sur l'état de la GAS.

3.4 Effet de la variation de la charge et de la gravité du défaut sur le contenu spectral du courant statorique

Afin de bien dévoiler l'influence de la gravité du défaut selon les différentes charges, la représentation des amplitudes à la fréquence caractéristique ($2gf_s$) en fonction de la gravité et ce pour chaque vitesse de rotation (variation de charges) est illustré sur la Figure (3.21).

Elle montre clairement une nette augmentation de cette amplitude selon la gravité et selon la charge appliquée.

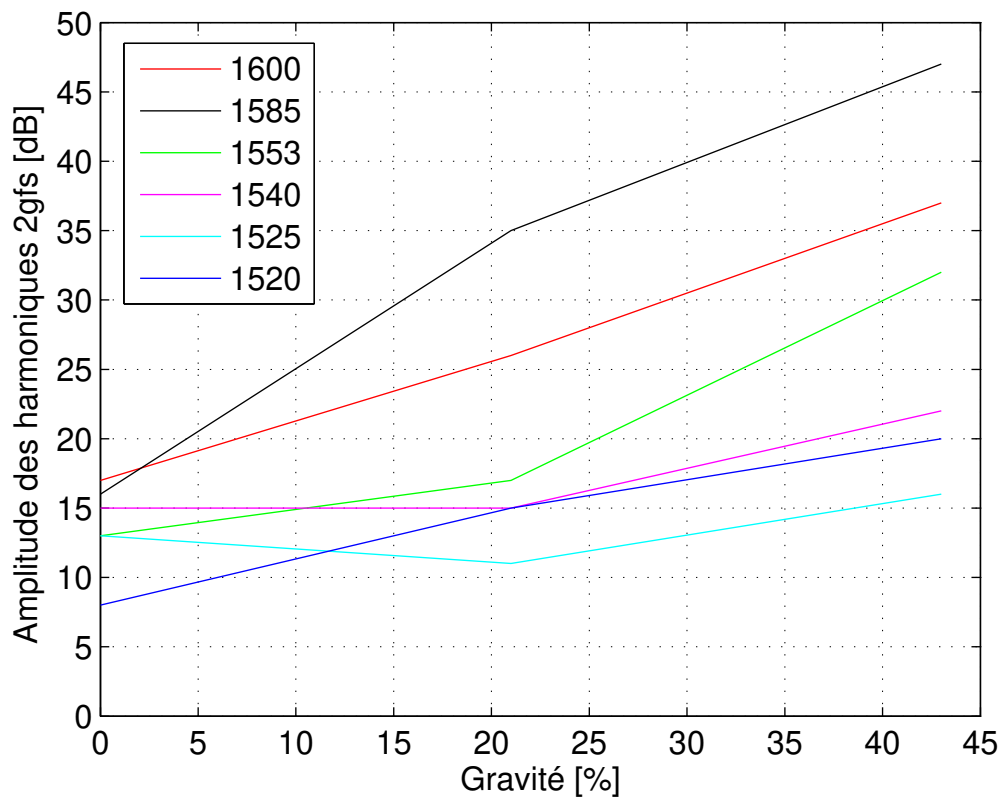


Fig. 3.21. Evolution de l'amplitude à la fréquence caractéristique ($2gf_s$) en fonction de la gravité du défaut de déséquilibre (0%, 21% et 43%) pour chacune des charges

Cette étude a montré que la vitesse a un effet sur :

- L'amplitude des harmoniques
- L'emplacement des harmoniques

Comme les défauts ont une influence sur l'amplitude de quelques fréquences comme nous avons l'indiqué avant. Cela peut considérer comme une importante information sur l'état de la machine.

Enfin, on peut dire que le spectre et le spectre d'enveloppe ont des représentations différentes d'harmoniques, mais ils ont une richesse d'informations sur l'état de la machine.

3.5 Conclusion

La MCSA, par la transformée de fourrier rapide (FFT), nous a permis de déterminer la composition fréquentielle des mesures du courant et donc de retrouver les raies associées aux défauts . Nous avons montré que le bon choix de la résolution fréquentielle, permet de séparer les composantes le plus proches de fondamental. Les résultats de l'analyse effectuée nous ont permis d'arriver aux conclusions suivantes.

- Les amplitudes des harmoniques $(1 \pm 2g) \cdot f_s$, associées au défaut augmentent avec la gravité du déséquilibre.
- La charge est un paramètre important à prendre en considération en effet le diagnostic des défauts devient plus délicat lorsque le glissement est proche de zéro.

L'analyse spectrale du courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par le défaut du déséquilibre. Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence.

- présentes dans le spectre fréquentiel du courant statorique
- permet de détecter la présence d'un défaut du déséquilibre

Cette approche nous a permis de détecter le défaut du déséquilibre en se basant sur le spectre et le spectre d'enveloppe afin d'avoir des bons résultats.

L'analyse de l'amplitude des harmoniques dans le spectre et le spectre d'enveloppe du courant statorique a donné des informations cruciales non négligeables pour le diagnostic des défauts rotoriques.

Conclusion générale

En maintenance prédictive, La détection des défauts constitue l'une des étapes les plus importantes. De nos jours, beaucoup de techniques de diagnostic des équipements industriels ont été proposées par les chercheurs. Souvent, on fait appel à un outil universel, l'analyse de la signature électrique. Cela consiste à mesurer les courants circulant dans les câbles de raccordement de la machine. L'analyse des courants a fait ses preuves en permettant de détecter pratiquement les défauts susceptibles d'apparaître sur les machines électriques.

Nous avons ensuite présenté divers outils issus des techniques de traitements du signal permettant l'analyse des signaux révélateurs d'un défaut électrique et/ou mécanique dans le domaine fréquentiel. Nous avons discuté des méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine électrique pour établir la présence des défaillances.

L'étude analytique de défaut nous a permis d'analyser et d'expliquer l'influence du déséquilibre électrique au rotor sur le fonctionnement de la génératrice à double alimentation (GADA). Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide est appliquée sur les signaux du courant statorique, afin de déterminer la composition fréquentielle de ces signaux et par conséquent, trouver les harmoniques caractérisant le défaut. Il s'est avéré que la détection des défauts est plus aisée si l'on applique l'analyse d'enveloppe sur les signaux du courant statorique. Nous avons, d'ailleurs, montré l'influence de la charge et la gravité du défaut sur les composantes spectrales caractérisant un défaut de déséquilibre électrique au rotor d'une génératrice à double alimentation ainsi la transformée de Hilbert appliquée au module du spectre du courant statorique a alors été utilisée. Cette méthode, validée à partir de plusieurs essais expérimentaux, a permis la détection d'un défaut rotorique naissant pour différents un couple de charge.

Pour finir dans le cadre plus général du diagnostic de la machine, il faudrait tester la capacité de nos méthodes à diagnostiquer d'autres types de défauts. Par exemple, nous savons que l'apparition d'un défaut de roulement ou de court-circuit entre-spores modifie le contenu spectral du courant statorique. L'évaluation d'un indice calculé à partir des composantes spécifiques à ces défauts permettrait alors d'obtenir un système de diagnostic complet.

Bibliographie

- [1] Abderrahim ALLAL. “Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones. Mémoire de Magister, Université de sétif”. In : 2010.
- [2] Daniel BEAUFILS. “Modulation de fréquence et synthèse FM”. In : *Bulletin de l’Union des Physiciens* 794 (1997), p. 929-945.
- [3] Nouredine BESSOUS, Ali CHEMSA et Salim SBAA. “New Vision about the Mixed Eccentricity Fault Causes in Induction Motors and its relationship with the Rolling Element Bearing Faults : Analytical model dedicated to the REB faults”. In : *2018 International Conference on Communications and Electrical Engineering (ICCEE)*. IEEE, p. 1-11. ISBN : 1728101123.
- [4] Martin BLÖDT. “Condition monitoring of mechanical faults in variable speed induction motor drives-application of stator current time-frequency analysis and parameter estimation”. Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2006.
- [5] Alain BOULENGER et Christian PACHAUD. *Aide-mémoire Surveillance des machines par analyse des vibrations*. Dunod, 2009. ISBN : 2100541900.
- [6] JR CAMERON, WT THOMSON et AB DOW. “Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors”. In : *IEE Proceedings B-Electric Power Applications*. T. 133. 3. IET. 1986, p. 155-163.
- [7] Jean CHATELAIN. *Machines électriques*. T. 10. PPUR Presses polytechniques, 1989.
- [8] Peiqing CHEN. “Digital signal processing tutorial”. In : (2004).
- [9] Francis COTTET. *Aide-mémoire de traitement du signal*. Dunod, 2000. ISBN : 2100051687.
- [10] Gaëtan DIDIER. “Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances”. In : *These de doctorat de l’université Henri Poincaré, Nancy-I* (2004).
- [11] Gaëtan DIDIER. “Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances”. In : *These de doctorat de l’université Henri Poincaré, Nancy-I* (2004).
- [12] Michael FELDMAN. “Hilbert transform in vibration analysis”. In : *Mechanical systems and signal processing* 25.3 (2011), p. 735-802. ISSN : 0888-3270.
- [13] F FILIPPETTI et al. “Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors”. In : *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE, p. 92-99. ISBN : 078030635X.

- [14] Etienne FOURNIER. “Protocole de diagnostic des entraînements asynchrones par références : application à la détection des déséquilibres mécaniques et des défauts de courroies”. Thèse de doct. 2015.
- [15] Zine GHEMARI. “Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration (accéléromètre)”. Thèse de doct. Déc. 2013.
- [16] KHELF ILYES. “Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l’intelligence artificielle”. Thesis. 2014.
- [17] Shahin Hedayati KIA, Humberto HENAO et Gérard-André CAPOLINO. “Gear tooth surface damage fault detection using induction machine stator current space vector analysis”. In : *IEEE Transactions on industrial Electronics* 62.3 (2014), p. 1866-1878.
- [18] Ahmet KUCUKER et Mehmet BAYRAK. “Detection of mechanical imbalances of induction motors with instantaneous power signature analysis”. In : *Journal of electrical engineering and technology* 8.5 (2013), p. 1116-1121.
- [19] Bhagwandas Pannalal LATHI et Roger A GREEN. *Linear systems and signals*. T. 2. Oxford University Press New York, 2005.
- [20] Jun-Lin LIN et al. “Motor shaft misalignment detection using multiscale entropy with wavelet denoising”. In : *Expert systems with applications* 37.10 (2010), p. 7200-7204.
- [21] Jun MA et C James LI. “Gear defect detection through model-based wideband demodulation of vibrations”. In : *Mechanical systems and signal processing* 10.5 (1996), p. 653-665.
- [22] O MONNOYE et I BLANC. “METHODES D’ECHANTILLONNAGE EN METROLOGIE ELECTRIQUE : APPLICATION AUX MESURES DE TENSION A TRES BASSE FREQUENCE”. In : ().
- [23] Freddy MUDRY. “Signaux et Systèmes”. In : *heig-vd (Haute Ecole d’Ingénieur et de Gestion du Canton de Vaud)* (2008).
- [24] Ziad OBEID. “Mise au point d’algorithmes pour la détection de dégradations de roulements d’actionneurs synchrones à aimants permanents. Application dans le domaine aéronautique sur des ventilateurs embarqués”. Thèse de doct. 2012.
- [25] KK PANDEY, PH ZOPE et SR SURALKAR. “Review on fault diagnosis in three-phase induction motor”. In : *MEDHA-2012, Proceedings published by International Journal of Computer Applications (IJCA)* (2012), p. 8680-1024.
- [26] Sulzer PUMPS. *Centrifugal pump handbook*. Butterworth-Heinemann, 2010.
- [27] K Deergha RAO et Satish TUNGA. *Signals and systems*. Springer, 2018. ISBN : 3319686747.
- [28] Hubert RAZIK. *La machine asynchrone à vitesse variable. Sous-titre : capteurs, modèles, contrôle et diagnostic*. 2006. ISBN : 2746213818.
- [29] Hubert RAZIK. *La machine asynchrone à vitesse variable. Sous-titre : capteurs, modèles, contrôle et diagnostic*. 2006.

- [30] Mohamed SAHRAOUI et al. “Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors—Simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents”. In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 16.9 (2008), p. 1503-1513. ISSN : 1569-190X.
- [31] Hajime YAMASHINA, Susumu OKUMURA et Isao KAWAI. “Development of a diagnosis technique for failures of V-belts by a cross-spectrum method and a discriminant function approach”. In : *Journal of intelligent manufacturing* 7.1 (1996), p. 85-93.
- [32] Donatella ZAPPALA. “Advanced algorithms for automatic wind turbine condition monitoring”. Thesis. 2014.

