

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



Année 2009

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'électrotechnique

## MEMOIRE

*Présenté pour l'obtention du diplôme de **Magister***

*Option : **Commande Electrique***

# T H E M E

**CONTRIBUTION AU DIAGNOSTIC DE DEFAUT  
DANS UNE CHAINE DE PRODUCTION D'ENERGIE**

Présenté par : **ATOUI Issam**

Directeur de mémoire : **Dr. BAHI Tahar M.C**

**Université de Annaba**

Devant le jury :

**Président : Dr. DEBBACHE Nasser Eddine PR U. Annaba**

**Examineurs : Dr. BOUAZZA Salah eddine M.C U. Annaba**  
**Dr. MOUSSAOUI Abdelkrim M.C U. Guelma**  
**Dr. RAMDANI Messaoud M.C U. Annaba**

## Résumé

Le suivi de l'état de fonctionnement d'une installation éolienne permet de signaler les dysfonctionnements d'une manière précoce et d'y remédier dans les délais avant qu'ils n'engendrent des défaillances requérant l'arrêt inopiné du procédé de conversion. Il permet aussi de remplacer la maintenance préventive par une maintenance prédictive. Cette dernière consiste en un planning des opérations de maintenance basé sur l'information fournie par le système de surveillance. Cette stratégie peut apporter incontestablement une diminution substantielle des coûts de maintenance du système.

L'objectif de ce travail est l'étude par simulations des défauts de la génératrice d'une chaîne éolienne. A cet effet on étudiera le défaut d'excentricité dans une génératrice asynchrone à double alimentation (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) et les défauts de ruptures des barres ou des anneaux rotoriques dans une génératrice asynchrone auto-excitée.

Au début, les modèles de l'ensemble de la chaîne de conversion (turbine, génératrice, charge et régulation) sont validés par Simulation sous MatLab Simulink, En suite, la détection de défaut dans la génératrice sont considéré en utilisent trois méthodes de traitements du signal, notamment, l'analyse rapide de fourrier, l'analyse de fourrier à fenêtre glissante et la technique des ondelettes, ont été considéré.



## Abstract

Monitoring the operating condition of a wind facility can report the malfunctioning of an early and remedy them in time before they engender failures requiring unplanned shutdowns of the conversion process. It also replaced by preventive maintenance predictive maintenance. This is a maintenance schedule based on information provided by the monitoring system.

This strategy can certainly make a substantial reduction in maintenance costs of the system. The objective of this work is the simulation study of methods of fault diagnosis for a string whether wind generator equipped with Double-Fed Induction Generator (DFIG) or an induction generator self-excited. We focus specifically on the detection of faults in the generator. We consider particularly the lack of eccentricity in an induction generator power double faults and failures of rings gold bars in a rotor induction generator self-excited.

The validation by simulation of the turbine, generator, load and regulation of MatLab Simulink, Considering three methods of signal processing, including the fast Fourier transform, Short-Time Fourier Transform and the technique of wavelet transform for the diagnosis of possible defects of the generator are presented.



## ملخص

إن رصد حالة تشغيل منشأة إنتاج الطاقة الكهربائية الهوائية يمكن من اكتشاف الخلل في وقت مبكر ومعالجته في الوقت المناسب قبل أن يولد هذا الأخير توقف غير مخطط له لعملية التحويل. حيث يقوم على تعويض الصيانة الوقائية بالصيانة التنبؤية. هذه الأخيرة تركز على مجموعة من الأوامر التي تستند على أساس المعلومات التي يوفرها نظام المراقبة. و مع هذه الإستراتيجية يمكن بالتأكد إجراء تخفيض كبير في تكاليف صيانة النظام.

والهدف من هذا العمل هو دراسة مع المحاكاة الأساليب الممكنة لتشخيص الأخطاء من اجل سلسلة إنتاج الطاقة الكهربائية الهوائية سواء كانت هذه السلسلة مجهزة بمولد قفص السنجاب اللاتزامني ذو الاشتغال الذاتي أو مولد اللاتزامني المضاعف التغذية. نحن نركز تحديدا على اكتشاف الأعطال في المولدات الكهربائية.

نحن نعتبر وجود انحراف في مولد اللاتزامني المضاعف التغذية أو الخلل في الواصلات أو القضبان في مولد اللاتزامني ذو الاشتغال الذاتي.

التحقق مع المحاكاة لمجموع التوربين ، المولدات ، المستهلك والتنظيم باستعمال ماتلاب Simulink ، حيث نركز على ثلاث طرق لمعالجة الإشارات ، بما في ذلك التحويل السريع لفورييه ، تحليل فورييه مع النافذة المنزلقة وتقنية المويجات لتشخيص العيوب المحتملة للمولد.



# Dédicace

Je rends grâce a dieu de m'avoir donner le courage et la volonté d'avoir pu terminer cette mémoire de magister.

Je dédie ce travail a :

Mes très chers parents pour leur soutient et leur patience, a qui je souhaite tout le bonheur du monde.

A mes sœurs et mes frères

*A toute ma famille,*

A tout ceux qui m ont aide de loin ou de prés durant mes études

A tout mes amis

Atoui issam



## *Remerciements*

Je remercie ALLAH qui m'a aidé pour faire le présent travail.

Ce travail a été réalisé au sein du département d'électrotechnique, faculté des sciences de l'ingénieur de l'Université Badji Mokhtar-Annaba et mené sous la direction de Monsieur Bahi Tahar, maître de conférences au département d'électrotechnique, à qui j'exprime ma profonde gratitude pour la confiance qu'il m'a faite en me donnant la chance de travailler avec lui, même en dehors de ses heures de service pour qu'il me facilite la tâche. Je le remercie très chaleureusement pour l'intérêt qui a été porté de sa part à mon travail, pour son soutien permanent et ses précieux conseils, qui ont permis une progression concrète du travail.

Mes remerciements vont également à mes chers parents et frères que ELLAAH les garde, pour leur soutien moral.

Mes remerciement, touchent aussi toutes la famille Atoui, karboua, Ayache.

Je tiens vraiment à remercier très chaleureusement le professeur Azzouz Yacine, Responsable du Laboratoire d'électrotechnique ESI-GELEC ,Ecole Supérieure d'Ingénieurs à Saint-Étienne (France) ,pour la confiance, et de m'avoir offert un stage au sein des son équipe au vue du la proposition d'un inscription en thèse de doctorat.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur DEBACHE.NE, professeur au département d'automatique, pour l'honneur qu'il me fait en présidant le Jury de soutenance, qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements les plus vifs. Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur BOUAZZA.SE, pour avoir bien voulu porter une attention particulière à ce travail en faisant partie des examinateurs. Je remercie vivement Monsieur MOUSSAOUIA, Enseignant à université de Guelma, qui m'a grandement honoré en acceptant d'être examinateur. Aussi, je remercie vivement Monsieur RAMDANI.M, Enseignant au département d'automatique, qui m'a grandement honoré en acceptant d'être examinateur. Mes remerciements vont également aux enseignants et travailleurs de l'Université Badji Mokhtar-Annaba.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont pu m'aider dans la réalisation de ce travail sans oublier les amis et les collègues pour leur présence à mes côtés tout au long de cette étude.



# Sommaire

## Introduction générale

### Résumé

## *Chapitre I Généralité sur les systèmes éoliens*

Introduction		
I.1	Historique	01
I.2	Mode de fonctionnement.	02
	I-2-1. Explication de l'origine des vents.	02
	I-2-2. Fonctionnement de l'éolienne.	02
I.3	Composition de l'éolienne	02
	I-3-1. La nacelle	02
	I-3-2. Le système d'orientation.	03
	I-3-3. Le mat	03
	I.3.4. Armoire de couplage au réseau électrique	03
I.4	Les différentes catégories d'éoliennes	03
I.5	Génération de puissance	04
I.6	Caractéristique d'une éolienne	04
I.7	Types de machines électriques	06
I.8	La loi de Betz	07
	I.8.1. Le freinage idéal du vent	07
	I.8.2. Limite de Betz	08
I.9	Modélisation d'une éolienne	09
	I.9.1. Equations du mouvement d'une pale	10
	I.9.2. La chaîne de conversion	12
	I.9.3. Modélisation de la turbine	12
	I.9.4. Limitation de la vitesse mécanique	13
I.10	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	14
	1.10.1 Avantages	14
	1.10.2 Inconvénients	14
I.11	Avenir de l'éolien ? Eoliennes en mer : L'offshore	15
I.12	conclusion	15

## *Chapitre II : Modélisation et simulation de la machine asynchrone auto-excitée en présence de défauts*

Introduction		16
II.1	Description du Systeme Eolienne	16
II.2	Modélisation du dispositif	17
	II.2.1 Modélisation de la génératrice asynchrone incluant des dysfonctionnements	17
	II.2.1.1 calcul des inductances	17
	II.1.1.2 Mise en équations	18



II.2.2	Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage	20
II.2.3	Prise en compte du phénomène de saturation magnétique	22
II.2.4	Modélisation de la charge	24
II.2.4.1	Transformation étoile-triangle	24
II.2.4.2	Equations de la charge	25
II.2.4.3	Modélisation biphasée de la charge	26
II.2	Modèle global de simulation	27
II.3	Simulation et Interprétation	27
II.4	Conclusion	35

### ***Chapitre III : Modélisation et simulation de la MADA en présence de défauts***

Introduction	36	
III.1	Structure de la machine asynchrone à double alimentation	36
III.2	Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation incluant des dysfonctionnements	38
III.2.1	L'excentricité statique	39
III.2.2	L'excentricité dynamique	41
III.2.3	L'excentricité mixte	42
III.3	Model de simulation pour la machine asynchrone à double alimentation	44
III.4	Modélisation de la Charge	46
III.5	Simulation et Interprétation	46
III.6	Conclusion	52

### ***Chapitre IV : Méthode d'analyse de défauts***

Introduction	53	
IV.1	Technique de traitement du signal	53
IV.1.1	Théorie de la Transformé Rapide de Fourier	53
IV.1.1.1	Simulation	59
IV.1.1.2	Remarque	61
IV.1.2	Transformée de Fourier sur fenêtre glissante	62
A	Théorème d'incertitude de Heisenberg	62
B	Compacité des supports	62
IV.1.2.1	Choix de la fenêtre de Fourier fenêtrée	65
IV.1.2.2	Simulation du signal test en utilisant STFT	66
IV.1.3	La transformée en ondelettes	69
IV.1.3.1	Simulation	73
IV.2	Etude comparative	74
IV.2.1	Cas de la génératrice asynchrone auto-excitée	74
IV.2.2	Cas de la génératrice asynchrone double alimentation	77
IV.3	Conclusion	80
<b>Conclusion générale</b>		





## Liste des figures

	<b>Page</b>
1.1 Schéma d'une éolienne à axe vertical	02
1.2 Principe de la théorie de Betz	07
1.3 Classement des types d'éoliennes	09
1.4 Modélisation d'une éolienne	09
1.5 Angles caractéristiques	10
1.6 Mouvement de battement	10
1.7 Mouvement de traînée	11
1.8 Mouvement de torsion	11
1.9 Système de conversion d'énergie Eolienne	12
1.10 Structure de la commande	14
2.1 Système éolien	17
2.2 Circuit équivalent de la cage rotorique	18
2.3 Condensateur de l'auto-excitation de la GAS avec une charge triphasée	20
2.4 Schéma équivalent d'une phase de la machine asynchrone ramené au Stator	20
2.5 Transformation du schéma équivalent	21
2.6 Caractéristique $F(\omega s)$	22
2.7 Caractéristique $G(\omega s)$	22
2.8 Phénomène d'auto amorçage	23
2.9 Transformation étoile-triangle de la charge et des condensateurs d'amorçage	24
2.10 Courants de ligne et de phase et tensions composées	25
2.11 Schématique du model de la simulation	27
2.12 Simulation pour un fonctionnement sain	30
2.13 Simulations avec défauts de cassure de barre rotorique	31
2.14 Simulations avec défauts successives de cassure de barre rotorique	32
2.15 Simulation pour le 4 <sup>ème</sup> Cas	33
2.16 Analyses fréquentielles du courant statorique	34
3.1 Chaîne éolienne basée sur la Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices	36



3.2	Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA	37
3.3	Configuration des enroulements et des flux	38
3.4	Excentricité statique	40
3.5	Représentation schématique simplifiée d'une MADA	44
3.7	Simulation pour la 1 <sup>ère</sup> Cas	49
3.8	Simulation pour le 2 <sup>ème</sup> Cas	50
3.9	Simulation pour le 3 <sup>ème</sup> Cas	50
3.10	Simulation pour le 4 <sup>ème</sup> Cas	51
3.11	Analyse fréquentielle de courant statorique	51
4.1	Traitement analogique d'un signal $x(t)$ .	55
4.2	Traitement numérique d'un signal analogique $x(t)$	55
4.3	Numérisation d'un signal	55
4.4	Fenêtres d'observation Rectangulaire	57
4.5	Fenêtres d'observation de Hanning	57
4.6	Fenêtres d'observation de Hamming	58
4.7	Fenêtres d'observation de Blackman	58
4.8	Signal de test du domaine temporel	59
4.9	Transformée de Fourier du signal	59
4.10	Signal "impulsion de Dirac"	60
4.11	Transformée de Fourier du signal "impulsion de Dirac"	60
4.12	Signal non stationnaire de test.	61
4.13	Transformée de Fourier du signal	61
4.14	Boîte de Heisenberg	63
4.15	Transformée de Fourier sur une fenêtre glissante	64
4.16	fenêtre $g$	65
4.17	Représentation temps fréquence du signal du test 1 en utilisant STFT	67
4.18	Signal "impulsion de Dirac" et sa transformée (STFT)	68
4.19	Représentation temps fréquence du signal du test 3 en utilisant STFT	69
4.20	Boîtes de Heisenberg d'atomes d'ondelettes	71
4.21	La transformée de Fourier sur une fenêtre glissante et DWT	72
4.22	Représentation temps échelle du signal en utilisant la transformée en ondelette	73
4.23	Transformée en ondelettes de Signal "Dirac"	74
4.24	Représentation temps échelle du signal en utilisant la transformée en ondelette	74



4.25	Analyse temps fréquence du courant par STFT pour le cas sain	75
4.26	Analyse temps échelle du même courant en utilisant la transformée en ondelette	75
4.27	Analyse temps fréquence du courant par “STFT » pour le 2 <sup>ème</sup> cas	75
4.28	Analyse de courant pour le 2 <sup>ème</sup> cas en utilisant la transformée en ondelette	76
4.29	Analyse temps fréquence du courant par “STFT » pour le 3 <sup>ème</sup> cas	76
4.30	Analyse de courant pour le 3 <sup>ème</sup> cas en utilisant la transformée en ondelette	76
4.31	Analyse temps fréquence du courant par “STFT » pour le 4 <sup>ème</sup> cas	77
4.32	Analyse de courant pour le 4 <sup>ème</sup> cas en utilisant la transformée en ondelette	77
4.33	Courant statorique et rotorique dans le cas sain	77
4.34	Analyse temps fréquence du courant statorique par STFT pour le cas sain	78
4.35	Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en ondelette.	78
4.36	Analyse temps fréquence du courant statorique par STFT.	78
4.37	Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en ondelette.	78
4.38	Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en STFT.	79
4.39	Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en ondelette.	79
4.40	Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en STFT.	79
4.41	Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en ondelette.	79



## Liste des Tableaux

	<b>Page</b>
2.1 Table 1.1 : Donne de l'application pour la génératrice asynchrone auto excité	27
3.1 Table 3.1 : Donne de l'application pour la machine asynchrone à double alimentation	46
4.1 Table 4.1 : Différente type de fenêtres	66



## **Introduction Générale**

L'énergie éolienne a connu une très forte croissance grâce aux avantages qu'elle présente pour l'environnement, aux percées technologiques connexes et aux programmes d'encouragement gouvernementaux dans le monde [1], [2].

Les générateurs à courants alternatifs utilisés pour les systèmes éoliens sont en grande majorité des génératrices asynchrones cependant, puisque elles sont susceptibles de présenter des défauts et par conséquent l'arrêt intempestif de la chaîne, alors, leur maintenance et leur diagnostic sont devenus un enjeu économique [3]. Donc, il est important de détecter de manière précoce leurs défauts éventuels.

Le diagnostic et la surveillance d'un dispositif, ne seraient efficaces que si le comportement sain, et de ses différents modes de fonctionnement est totalement maîtrisé.

La difficulté de la détection de défaut vient de la pluridisciplinarité des connaissances qu'elle nécessite. L'étude des entraînements électriques relève tout à la fois de l'électrotechnique, de l'électronique de puissance, de la mécanique, de l'automatique et de l'informatique.

Le travail de mémoire, s'inscrit dans le domaine de la détection et du diagnostic des défauts d'une machine asynchrone triphasée installée dans une chaîne de conversion éolienne. Profusions de la vitesse d'information du courant statorique, la détection et la localisation des défauts électriques grâce à l'utilisation de la méthode de traitement du signal [4]. Les méthodes de traitement numérique de base utilisées dans ce travaux sont la transformée de Fourier rapide (FFT) ; transformée de Fourier sur fenêtre glissante (STFT) et la transformée en ondelettes.

✓ Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons des généralités sur les systèmes Eoliens. Au début, le mode de fonctionnement, la constitution sont précisés. Par la suite, les différents types de machines électriques utilisées pour les systèmes éoliens sont considérés.

À la fin de ce chapitre, la modélisation du système éolien (Equations du mouvement d'une pale et la modélisation de la turbine), sont développés.

En ce qui concerne le deuxième chapitre, on présente, en un premier lieu la modélisation de la machine asynchrone auto-excitée en présence de défaillance puis du phénomène d'auto-excitation de la machine asynchrone par un banc de capacités. Nous modélisons la charge électrique dans le repaire triphasée et biphasée. Finalement, nous validons ces modèles par des simulations du modèle global (turbine- multiplicateur- génératrice- charge) en appliquant



la stratégies de commande par limitation de la vitesse mécanique de rotation de la turbine éolienne.

Pour le troisième chapitre, est consacré à la présentation et à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation incluant des dysfonctionnements. Nous avons commencé par une introduction sur la structure de la MADA puis on a développé son model triphasé tien aux comptes de défaut d'excentricité statique, dynamique et mixte. Aussi, nous présentons le model de simulation de la machine et de la charge électrique dans le repaire triphasée. A la fin de ce chapitre, les simulations du modèle global en appliquant la stratégie de commande par limitation de la vitesse mécanique de rotation de la turbine éolienne sont présentés et interprétés.

Dans le quatrième chapitre, nous donnons des définitions et des propriétés sur des différentes méthodes de traitement de signal. Nous avons commencé par donner les généralités et nous avons présente les principales applications de l'analyse par la transformation rapide de Fourier, la Transformée de Fourier sur fenêtre glissante et leurs principal inconvénient. Nous nous intéressons à la transformée en ondelettes continu et discrète. Que nous l'avons consacré à l'application des différentes méthodes de traitement de signal sur le courant de la génératrice asynchrone pour la détection des différents défauts dans les deux types de machines asynchrones installées dans une chaîne de conversion éolienne. Des résultats de simulations sont présentés et interprétés.



## **Chapitre I**

### **Généralité sur les systèmes éoliens**

#### **INTRODUCTION**

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. La plupart est fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir grâce aux avantages qu'elles présentent pour l'environnement.

Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité [5].

Parmi les principaux modes de production d'énergie électrique renouvelables, on trouve les l'énergie éolienne, destinées à convertir une partie de l'énergie cinétique produite du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission dans le but de produire de l'électricité par l'intermédiaire d'une génératrice [6]. Le vent entraîne la turbine à basse vitesse accouplée à un générateur, transformant l'énergie cinétique produite en énergie électrique. Les générateurs entraînés par des turbines éoliennes sont souvent couplés par l'intermédiaire d'un multiplicateur mécanique afin d'adapter la vitesse lente de la turbine à la vitesse rapide de la génératrice.

#### **I.1 Historique**

Depuis l'Antiquité, les moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique (généralement utilisé pour moulin du grain). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, généralement utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides, ou abreuver le bétail [6].

En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs [7].

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse [8]. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend 72 exemplaires en 1908 [8].

Une éolienne expérimentale de 800 kVA fonctionne de 1955 à 1963 en France, à Nogent-le-Roi dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'Études Scientifiques et Techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF. Simultanément, deux éoliennes Neyrpic de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à Saint-Rémy-des-Landes



(Manche). Il y eut également une éolienne raccordée au secteur sur les hauteurs d'Alger (Dély-Ibrahim) en 1957 [9].

Cette technologie ayant été quelque peu délaissée par la suite, il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier, pour que le Danemark reprenne les développements d'éoliennes [10].

## I.2 Mode de fonctionnement

### I.2.1 Explication de l'origine des vents

Le vent résulte d'une différence de pression entre deux points, l'air se déplace des lieux de haute pression aux lieux de basse pression. Ce sont ces déplacements d'air qui produisent le vent qui peut être plus ou moins fort selon les régions.

### I.2.2 Fonctionnement de l'éolienne

Le but d'une éolienne ou d'un aérogénérateur est très simple, il s'agit de transformer l'énergie cinétique produite par le vent en énergie mécanique de translation dans le but de produire de l'électricité. On trouve deux types d'éoliennes, celles à axe horizontal et celles à axe vertical, les dernières dont on présente schématiquement par la figure 1.1 sont beaucoup plus utilisées [11].

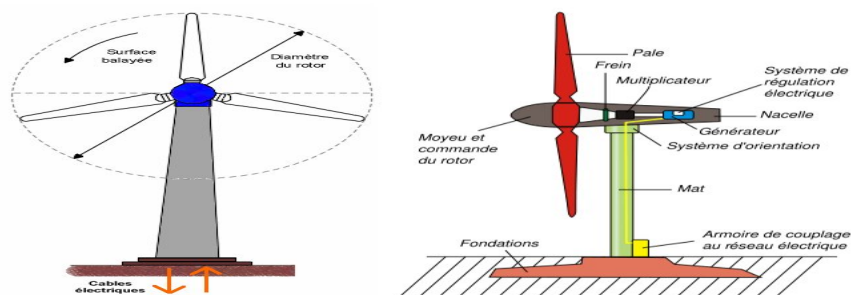


Fig.1.1.Schéma d'une éolienne à axe vertical

## I.3. Composition de l'éolienne

### I.3.1. La nacelle

Elle supporte :

-Les pales, le moyeu et le rotor : captent l'énergie produite par le vent et la transforment en énergie mécanique de rotation [6].



-*Le frein* : Permet à l'éolienne de fonctionner en cas de vitesses des vents trop importantes qui pourraient l'endommager ou la rendre incontrôlable en réduisant la vitesse de rotation du premier rotor.

-*Le multiplicateur* : Augmente la vitesse de rotation d'un second rotor avec un système d'engrenages pour la génératrice électrique.

-*La génératrice* : Transforme l'énergie mécanique de rotation disponible sur la second rotor en énergie électrique.

-*Le système de régulation électrique* : Ralenti le rotor du générateur en cas de surrégime.

**I.3.2. Le système d'orientation** : Il place la nacelle et donc les pales face au vent [13].

**I.3.3. Le mat** : Il Place l'éolienne à une certaine distance du sol, selon la configuration du terrain et les vents de ces lieux.

**I.3.4. Armoire de couplage au réseau électrique** : Elle rend compatible l'énergie produite avec celle du réseau ce qui consiste à transformer la tension produite par la génératrice à une grande tension et la réinjecte dans celui-ci.

## **I.4. Les différentes catégories d'éoliennes**

Il existe trois catégories d'éoliennes à axe horizontal (les éoliennes lentes, les éoliennes rapides et les grandes éoliennes) et trois types d'éoliennes à axe vertical (rotor de Darrius, rotor de Savonius et statoéolienne).

Concernant les éoliennes à axe horizontal, les éoliennes lentes sont caractérisées par une multitude de pales qui couvrent toute la surface de la roue. Elles sont adaptées aux vents de faible vitesse [14].

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales beaucoup plus restreint puisqu'il varie entre 2 et 4. L'intérêt des éoliennes rapides est qu'elles sont à puissance égale beaucoup plus légères et donc moins chères que les éoliennes lentes [15].

Et, les grandes éoliennes ont généralement trois pales installées au sommet d'un mât d'au moins 50 mètres, ceci leur assure un bon rapport puissance/poids et économise les matériaux de construction [16], [17].



Par ailleurs, les Eoliennes à axe vertical de type panémone de Davieus se destigie des quatre sortes de rotors: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique. Toutes ces machines ont besoin d'être soutenues par des câbles ou des cordages.

Pour Les éoliennes de type rotor de Savonius, leur rotor est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre.

Finalement, les éoliennes compactes qualifiées de statoéolienne. Leur rotor se présente comme une roue de moulin à aubes, basculée sur un axe vertical. Soutenu par l'Ademe [16].

### **I.5. Génération de puissance**

Plutôt que de créer des éoliennes gigantesques qui, une fois arrêtées, n'alimentent plus le réseau électrique, on préfère actuellement multiplier des unités un peu moins puissantes. Lorsqu'une éolienne nécessite un entretien ou qu'un bris est constaté, les autres continuent à produire, sans interrompre totalement l'alimentation fournie au réseau.

Une fois l'énergie électrique est produite par l'éolienne, il faut la transmettre ensuite au réseau de distribution. Et puisque la tension en sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de volts, Il est souvent nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur élévateur de tension qui permette de se raccorder au réseau.

### **I.6 Caractéristique d'une éolienne**

- On retient les caractéristiques suivantes : En principe, plus il vente fort, plus la production augmente. La puissance disponible est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Mais si on ne contrôle pas la vitesse du rotor, on peut gravement endommager l'éolienne, alors les Bien entendu, les fabricants règlent la vitesse maximale de leurs rotors à une valeur sécuritaire.
- La Vitesse nominale du vent est celle, à laquelle l'éolienne atteint sa puissance nominale. Bien que la plupart des fabricants fixent la vitesse nominale de vent autour de 40 à 50 km/h (25 à 30 mi/h), il n'y a pas de standard établi.
- La Vitesse nominale de rotation c'est le nombre de tours par minute (tr/min) effectué par le rotor à sa puissance nominale.
- La Vitesse d'amorçage est la vitesse du vent à laquelle l'éolienne commence à produire de l'énergie.



- Le rotor (l'hélice) sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Plus le diamètre du rotor (en mètres, m) est grand, plus la surface balayée (en mètres carrés, m<sup>2</sup>) sera grande.
- Le nombre de pales influence directement l'efficacité de conversion du rotor. C'est un élément essentiel dans la conception d'une éolienne. Pour un type de pales donné, plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor sera grand. Il faut évidemment avoir un couple minimal afin de lancer le rotor. La conception du rotor dépend de l'application.
- Les Dispositifs de régulation, protègent l'éolienne contre les vents forts et la survitesse du rotor. Ces dispositifs s'avèrent nécessaires pour deux raisons : d'abord pour protéger le générateur contre la surproduction et la surchauffe, ensuite pour éviter que l'éolienne ne vole en pièces par vents forts [13], [17]. Ces mécanismes de régulation sont classés en trois catégories :
  - décrochage aérodynamique ;
  - réduction de la surface effective balayée par le rotor ;
  - modification de l'angle de calage des pales.

Le décrochage aérodynamique est, en fait, une caractéristique inhérente à tout profil aérodynamique. Pour une vitesse de rotation donnée, quand le vent augmente, l'angle d'attaque du vent « vu » par la pale en rotation augmente aussi et amène éventuellement la pale à « décrocher ». Le rotor capte ainsi moins de puissance et se trouve un nouveau point d'opération plus sécuritaire pour la machine.

Pour réduire la surface balayée par le rotor, il s'agit d'augmenter l'angle formé par l'axe de rotation des pales et la direction du vent dominant, soit en faisant basculer l'hélice vers le haut (pour les modèles Wind Baron 750, Windseeker et Whisper) soit en le faisant pivoter sur le côté (pour les modèles Ruthland et Bergey). Ce mode de régulation utilise la pression du vent sur le rotor pour « effacer » le rotor. Cette méthode éprouvée s'avère très efficace pour le contrôle de la vitesse. Lorsque le rotor est décalé ainsi vers le haut ou sur le côté, le rendement du rotor diminue considérablement et la puissance produite chute rapidement.

La troisième méthode consiste à modifier l'angle de calage des pales. Au moment des variations de vitesse, on utilise la force centrifuge produite par la rotation du rotor pour changer l'angle de calage des pales. Plus les pales tournent vite, plus leur angle de calage augmente et elles entrent éventuellement en décrochage. Ce dispositif permet de maintenir la vitesse de rotation à une valeur sécuritaire au cours des tempêtes. Ce mécanisme de



régulation, qui possède de nombreuses pièces mobiles, est plus complexe mais, bien conçu, il permet d'obtenir une meilleure performance du système.

## **I.7. Types de machines électriques**

On peut retrouver trois types de machines électriques sur une éolienne : génératrice synchrone à aimants permanents, la génératrice à courant continu et génératrice asynchrone sans et avec balai [2].

Il y a production d'électricité lorsqu'on fait tourner un ou des conducteurs dans un champ magnétique. Le mouvement du conducteur dans ce champ magnétique induit un courant dans ce conducteur. C'est ce courant qui alimentera la charge désirée : batteries, onduleurs, éléments chauffants, etc.).

Dans les générateurs à aimants permanents, les aimants créent un champ magnétique permanent et constant. Les générateurs à aimants permanents produisent un courant et une tension de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation (qui varie elle-même selon les vents). Ce qui veut dire qu'on ne peut pas y connecter directement des charges électriques fonctionnant sur le 50~60 Hz. Pour les utiliser, il faudra redresser ce courant en courant continu, puis transformer le courant continu en courant alternatif de 50~60 Hz à l'aide d'un onduleur.

Cependant, contrairement aux générateurs à inducteur bobiné, les alternateurs à aimants permanents ont le désavantage de toujours produire la même densité de flux magnétique, alors que l'intensité du champ magnétique produit par un générateur à inducteur bobiné est proportionnelle au courant qui y circule et à la tension à ses bornes. De façon pratique, cela signifie que le flux magnétique s'intensifie à mesure que la vitesse du rotor augmente.

L'avantage des alternateurs à inducteur bobiné est leur facilité de démarrage par vents faibles. Ceci s'explique par le fait qu'il n'y a presque pas de flux magnétique développé par l'inducteur, donc une très faible résistance au mouvement pour l'armature en rotation. Le flux magnétique augmentera au fur et à mesure que les vents augmentent et ce jusqu'à ce que le rotor atteigne sa vitesse nominale.

Avec l'utilisation des machines à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au la charge par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe à travers le rotor. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.



C'est un générateur. Les plus simples et robustes sont des générateurs sans balais (à cage d'écureuil), mais il faut alors contrôler leur excitation par des condensateurs ou les relier au réseau, ce qui n'est pas facile. Ils est utilisé généralement pour les éolienne à vitesse fixe. L'introduction de convertisseur de puissance entre le générateur et la charge donne lieu à un découplage entre la fréquence du la charge et la vitesse de la machine électrique. La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation du convertisseur de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ce convertisseur, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille.

## I.8. La loi de Betz [18], [20]

### I.8.1. Le freinage idéal du vent

Plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus remarquable sera le ralentissement du vent sortant par le côté gauche de l'éolienne (Figure 1.2).

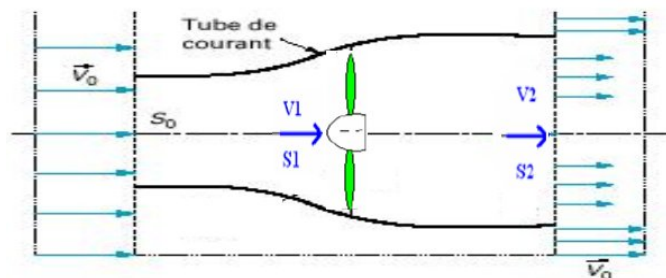


Fig.1.2. Principe de la théorie de Betz

- $V_0$  : vitesse axiale initiale du vent ;
- $S_0$  : surface à l'entrée du tube de courant ;
- $V_1$  : vitesse du vent dans le plan du rotor ;
- $S_1$  : surface du rotor ;
- $V_2$  : vitesse du vent à l'aval du rotor ;
- $S_2$  : surface à l'aval du rotor.

$$\text{Tel que : } V_0 > V_1 > V_2$$

Si nous tentions d'extraire toute l'énergie contenue dans le vent, l'air continuerait son chemin à une vitesse nulle, ce qui en réalité signifierait qu'il n'arriverait pas à abandonner le rotor. Le résultat serait dans ce cas tout le contraire de ce que nous aurions cherché à obtenir : aucune énergie ne serait extraite du vent, l'entrée de l'air dans le rotor étant évidemment également empêchée.



L'autre cas extrême serait que le vent passerait à travers le tube ci-dessus sans aucune perturbation, mais avec le même résultat : l'énergie extraite serait absolument nulle.

Nous pouvons donc assumer qu'il doit y avoir une manière de freiner le vent qui se trouve entre ces deux extrémités et qui permette de façon bien plus efficace de transformer l'énergie du vent en énergie mécanique. Il y a en fait une réponse très simple à cette question : une éolienne idéale freinerait le vent à 1/3 de sa vitesse originale. Afin de bien comprendre pourquoi, nous devons utiliser la loi physique fondamentale de l'aérodynamique des éoliennes.

- La puissance absorbée par le rotor est :

$$P = \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2) \quad (1.1)$$

Avec  $\rho$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) masse volumique de l'air.

- La variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air est:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho S_1 V_1 (V_0^2 - V_2^2) \quad (1.2)$$

$$P = \Delta E_c \text{ donne :} \quad V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (1.3)$$

L'étude de la variation de la puissance en fonction de la vitesse à l'aval,  $dP/dV_2$ , fournit une seule racine ayant un sens physique :  $V_2=V_0/3$ , correspondant au maximum de puissance.

### 1.8.2. Limite de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) ( $C_{p\text{max}} \approx 0.593$ ), de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1919, formula la loi de Betz pour la première fois. Son livre "Wind-Energie" (Energie éolienne) publié en 1926 donne une bonne idée de l'état des connaissances en énergie éolienne et des aérogénérateurs de l'époque [18].

Il est en fait très surprenant qu'il soit possible de formuler une telle théorie générale qui s'applique à toute éolienne ayant un rotor en forme de disque.

En définissant le coefficient de puissance

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S_1 V_0^3} \quad (1.4)$$

Ce coefficient de puissance permet de classer les différents types d'éoliennes suivant leur nature [19,20] (figure 1.3).



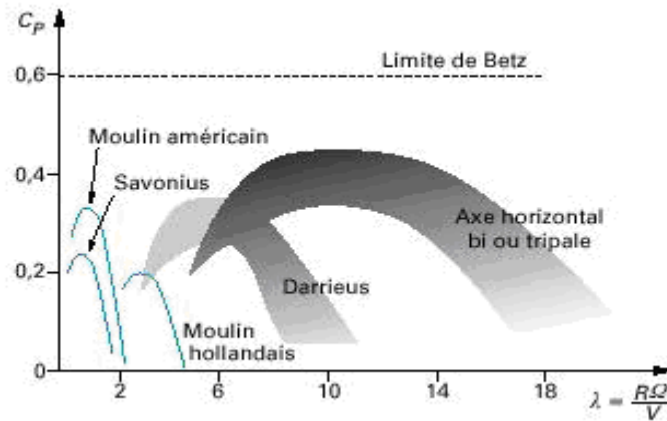
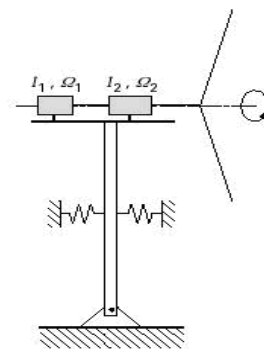


Fig.1.3. Classement des types d'éoliennes

Il est à noter que pour les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, le  $C_p$  se situe à 60-65 % de la limite de Betz : on ne récupère donc globalement que 40 % de l'énergie due au vent.

### I.9. Modélisation d'une éolienne

L'ensemble d'une éolienne, pales, moyeu, arbres, multiplicateurs, génératrice, tour, peut être représenté comme illustré sur la figure 1.3. L'étude de certains sous-ensembles de ce modèle (ligne d'arbres, tour) n'est pas spécifique au cas des éoliennes et ne sera donc pas abordée ici. On se consacrera plus particulièrement au comportement des pales et aux sollicitations qu'elles transmettent au moyeu puis à l'ensemble de la machine [21].



avec  $I_1$  et  $\Omega_1$  moment d'inertie et vitesse de rotation de l'élément 1 (ex : multiplicateur)  
 avec  $I_2$  et  $\Omega_2$  moment d'inertie et vitesse de rotation de l'élément 2 (ex : générateur)

Fig. 1.4. Modélisation d'une éolienne

La figure 1.5 présente les angles et repères caractéristiques d'une éolienne.

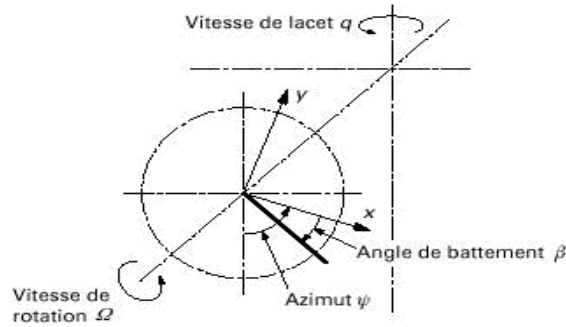


Fig. 1.5. Angles caractéristiques

**I.9.1. Equations du mouvement d'une pale [18]**

Trois mouvements distincts sont à considérer dans le cas d'une pale d'éolienne : battement, traînée et torsion.

En dehors de l'influence des efforts aérodynamiques, la figure 1.6 présente les sollicitations auxquelles est soumis un élément d'une pale articulée en battement.

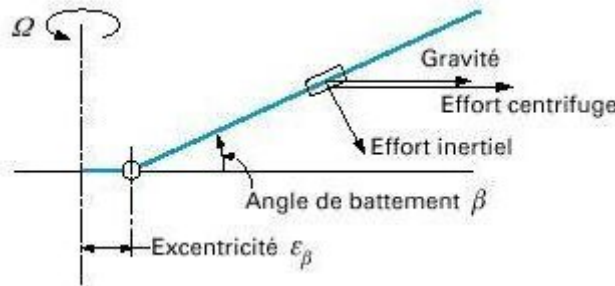


Fig. 1.6. Mouvement de battement

Si l'on considère la réduction des moments au niveau de l'articulation et en faisant l'hypothèse que l'angle de Figure battement reste petit, on obtient l'expression suivante qui décrit le mouvement de battement de la pale :

$$\ddot{\beta} + \Omega^2 [1 + \varepsilon_1 + \frac{G}{\Omega^2} \cos \Psi] \beta + \frac{K_\beta}{I_b} \beta = 0 \tag{1.5}$$

Avec,  $G = \frac{gM_p r_p}{I_b}$        $\varepsilon_1 = \frac{3 \varepsilon_\beta}{2(1 - \varepsilon_\beta)}$

Où

- B : angle de battement ;
- Ω : vitesse de rotation ;
- Ψ : azimut ;
- K<sub>β</sub> : raideur de l'articulation de battement ;





- $I_b$  : moment d'inertie en battement ;
- $g$  : accélération due à la pesanteur ;
- $M_p$  : masse d'une pale,  $r_g$  rayon de centre de gravité de la pale ;
- $e_\beta$  : excentricité de l'articulation de battement .

De la même manière (figure 1.7), on obtient l'équation du mouvement de la traînée :

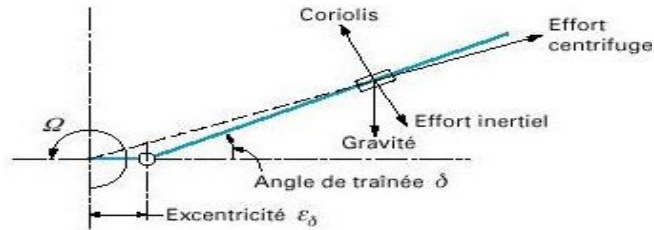


Figure 1.7. Mouvement de traînée

$$\delta'' + [\varepsilon_2 \Omega^2 + G \cos \psi + \frac{K_\delta}{I_b}] \delta - 2 \Omega \beta \dot{\beta} + G \sin \psi = 0 \tag{1.6}$$

Avec

$$\varepsilon_2 = \frac{3\varepsilon_\delta}{2(1 - \varepsilon_\delta)}$$

Où

$K_\delta$  : raideur de l'articulation de traînée

$\varepsilon_\delta$  : excentricité de l'articulation de traînée (ramenée au rayon R de la pale)

Enfin, l'équation du mouvement en torsion (figure 1.8) s'écrit :

$$\ddot{\theta} + [\Omega^2 + \frac{K_\theta}{I_t}] \theta = 0 \tag{1.7}$$

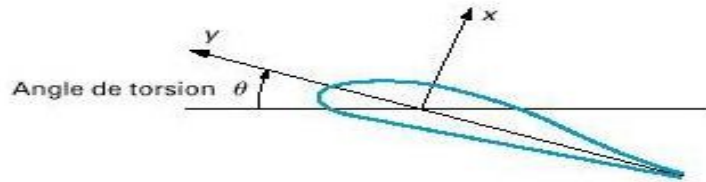


Fig. 1.8. Mouvement de torsion

Avec

$\Theta$  : angle de torsion.

$K_\theta$  : raideur de l'articulation de torsion.

$I_t$  : moment d'inertie en torsion.



En observant les termes de ces différentes équations, on peut faire les remarques suivantes :

- en l'absence d'excentricité, de gravité et de ressort d'articulation, la pale est animée d'un mouvement de battement dont la vitesse est égale à la vitesse de rotation de l'éolienne ;
- l'effet de l'excentricité conduit à une fréquence de battement supérieure à la fréquence de rotation. Par contre, en présence d'une excentricité, la fréquence de traînée est inférieure à la fréquence de rotation ;
- la présence du ressort augmente la fréquence du mouvement (battement, traînée, torsion).

On constate ainsi qu'en jouant sur quelques paramètres simples (excentricités, raideurs), il est possible de positionner les fréquences des premiers modes de la pale par rapport à la vitesse de rotation. Cela est particulièrement intéressant pour éviter des phénomènes de résonance avec certains modes du reste de la machine (tour, multiplicateur...).

### 1.9.2. La chaîne de conversion

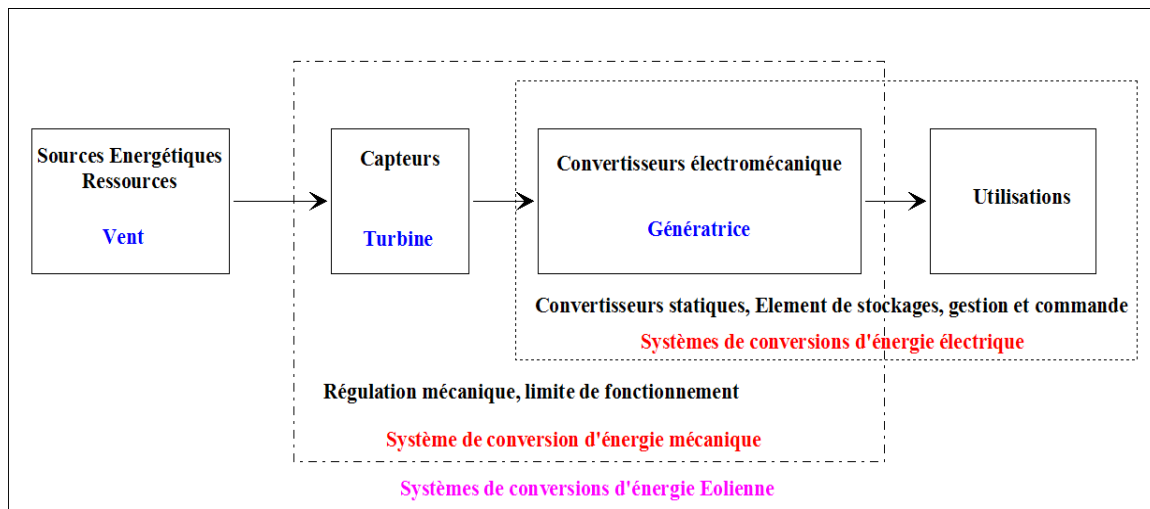


Fig. 1.9. Système de conversion d'énergie Eolienne

Pour exploiter l'énergie cinétique du vent, il est nécessaire que le site dispose d'un potentiel satisfaisant et que les structures supportent de grandes variations de vitesse.

### 1.9.3. Modélisation de la turbine

L'expression de la puissance mécanique récupérée par la turbine [21] est :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R_p^2 V^3 \tag{1.8}$$



Avec:

$\rho$  : masse volumique de l'air ( $\rho = 1.3 \text{ Kg} / \text{m}^3$ ),

$V$  : vitesse du vent,

$C_p$  : coefficient de puissance.

Selon [21,22] ce dernier coefficient est approché par la formule suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.4233 \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.0184(\lambda - 3)\beta \quad (1.9)$$

Où

$\lambda$  : vitesse spécifique ;

$\beta$  : angle d'orientation des pales.

Alors le couple aérodynamique s'écrit [23]:

$$C_{aero} = \frac{P_{turbine}}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho \pi R_p^2 V^3}{\Omega} \quad (1.10)$$

Le multiplicateur adapte la vitesse lente des pales à la vitesse rapide de la machine par le gain  $G$ . Le couple mécanique  $C_m$  et la vitesse, angulaire électrique du rotor de la machine  $\Omega_r$ , sont exprimés respectivement dans (1.11) et (1.12) :

$$C_m = C_{aero} / G \quad (1.11)$$

$$\Omega_r = G \Omega \quad (1.12)$$

L'équation dynamique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = C_m - C_{em} - f\Omega_r \quad (1.13)$$

Où

$J$  : inertie totale qui apparaît sur l'arbre de la génératrice.

$C_{em}$  : couple électromagnétique ;

$p$  : nombre de paires de pôles ;

$\Omega_r$  : vitesse angulaire électrique du rotor ;

$f$  : coefficient de frottement visqueux.

#### 1.9.4. Limitation de la vitesse mécanique

La figure 1.10, montre la structure de la commande maximale pour le contrôle de la vitesse de rotation par orientation des pales (variation de  $\beta$ ) [24] [25],



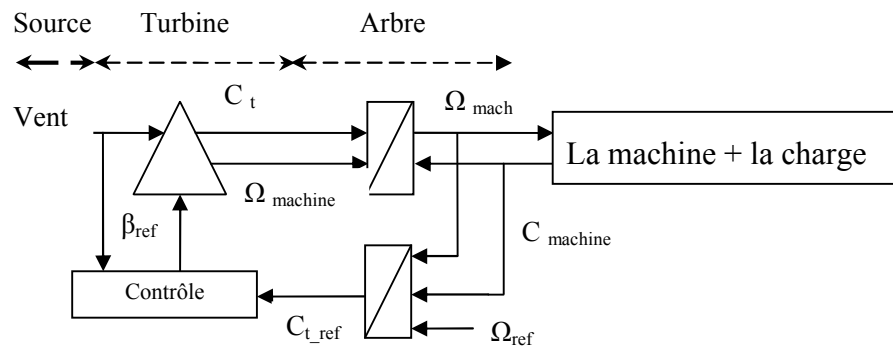


Fig.1.10. Structure de la commande

Le correcteur de vitesse est de type proportionnel avec une non linéarité.

Le couple  $C_t$  a été supposé proportionnel à la vitesse de rotation de la turbine  $\omega_t$

La stratégie de command est implantée selon l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} \beta_{ref} = \beta_0 = -2 & \text{Si } 0 < \omega_t < \omega_m \\ \beta_{ref} = \frac{\Delta\beta}{\Delta\omega}(\omega_t - \omega_m) + \beta & \text{Si } \omega_t > \omega_m \end{cases} \quad (1.14)$$

## I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Le développement d'outils informatiques, est aptes à traiter chacune des étapes nécessaires à l'aboutissement d'un projet de grande envergure et à permettre d'exploiter au mieux les possibilités d'un gisement de vent, permet d'envisager sereinement une part de plus en plus conséquente de ce type d'énergie dans la production mondiale d'électricité [20] [26].

### I.10.1. Avantages

- Rapidité d'installation ;
- Puissance beaucoup plus élevée que le solaire ;
- Energie respectueuse de l'environnement ;
- Autonomie énergétique, bon complément à d'autres sources (diesel, solaire).

### I.10.2. Inconvénients

- Investissement élevé ;
- Pas de rentabilité pour un site relié au réseau ;
- Risques causés par vents forts ;
- Surveillance technique.



### **I.11. Avenir de l'éolien ? Eoliennes en mer : L'offshore**

Le secteur de l'offshore Eoliennes en mer constitue un nouveau champ d'investigation au potentiel très important et en pleine phase d'expansion [20]. Il est la prolongation naturelle de l'implantation sur site terrestre. Son développement par la communauté éolienne n'a, en effet, été possible que grâce à la grande expérience déjà acquise sur terre, au développement des technologies, à l'augmentation de fiabilité et à la réduction des coûts de fabrication et de production.

### **I.12. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons récapitulé succinctement : une présentation générale sur l'énergie éolienne, décrit les différents types et de composants d'un système éolien avec les différents choix des machines utilisées pour la production d'énergie éolienne.

Un autre problème traité dans ce chapitre concerne la modélisation avec l'application de la commande par limitation de vitesse sur l'ensemble de système éolienne.



## **Chapitre II**

### **Modélisation et simulation de la Génératrice asynchrone auto-excitée en présence de défauts**

#### **Introduction**

Ce chapitre présente, une étude sur une machine asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée d'une chaîne éolienne. La première partie est une étape de modélisation de la machine avec model multi mailles et avec prise en compte du phénomène de saturation magnétique.

Le modèle de la charge et des capacités d'auto excitation est également établi de façon complètement indépendante du modèle de la machine. Des simulations sont alors effectuées dans différentes situations sain et avec défaut.

La seconde partie présente les résultats de simulation obtenus pour une machine présentant de ruptures de barre, ou d'anneaux rotoriques.

Une analyse spectrale du courant statorique de la génératrice faisant analogie au comportement de la machine en régime moteur en vue de détecter et diagnostiquer un défaut de rupture de barre rotoriques. Est introduite à la fin de chapitre.

#### **II.1. Description du Système Eolienne**

En générale, les petites éoliennes peuvent constituer une bonne alternative à la présence du réseau soit par génération directe de ce réseau soit par l'intermédiaire d'un système de stockage et d'un onduleur. Dans ce dernier cas, l'éolienne n'est pas complètement autonome puisque la présence de l'onduleur nécessite un dispositif de stockage d'énergie ou une source externe afin d'assurer la commande de celui-ci [27]. En cas de décharge totale du dispositif de stockage ou de défaillance de la source externe, il ne peut plus y avoir production d'énergie.

Le phénomène d'auto- excitation est difficile à maîtriser car les variations de charge influent directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées. De plus, un dispositif d'orientation des pales de l'éolienne est nécessaire afin de maintenir une vitesse de rotation et par conséquent une fréquence délivrées fixes.



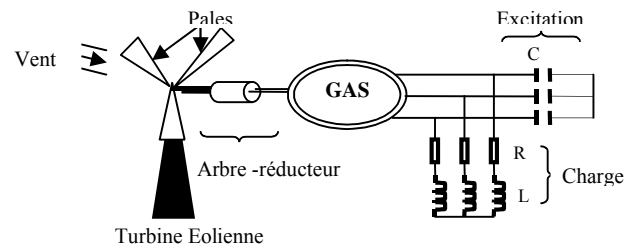


Fig. 2.1. Système éolien.

## II.2. Modélisation du dispositif

### II.2.1. Modélisation de la génératrice asynchrone incluant des dysfonctionnements

L'objectif est de développer un modèle mathématique basé sur la structure physique de la machine, qui soit capable de prendre en compte différents types de défauts. Dans cette étude, on considère que le bobinage stator est constitué de bobines connectées entre elles pour former les phases du bobinage et que la cage rotorique est modélisée par un circuit maillé. La répartition des barres dans les encoches est entièrement prise en compte, ainsi que les liaisons réalisées par les anneaux de courts circuits. Les circuits ainsi constitués sont magnétiquement couplés. Le point délicat réside dans la détermination des inductances.

#### II.2.1.1. calcul des inductances

L'inductance de la bobine de la phase statorique s'écrit :

$$B_{sm}(\theta) = \frac{2}{\pi} \mu \frac{N_s}{ep} I_{sm} \cos\left(p\theta - m \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.1)$$

Et, le flux principal et l'inductance cyclique sont donnés par :

$$\phi_{sm}(\theta) = \frac{4}{\pi} \mu \frac{N_s^2}{ep^2} R L I_{sm} \quad (2.2)$$

$$L_{sc} = \frac{3}{2} L_{sp} + L_{s1} = \frac{6}{\pi} \mu \frac{N_s^2}{ep^2} R L + L_{s1} \quad (2.3)$$

Afin de pouvoir détecter un défaut de barre dans la génératrice, nous avons considéré le modèle multi mailles pour la modélisation de son rotor [28]. La figure 2 illustre le circuit équivalent du rotor.

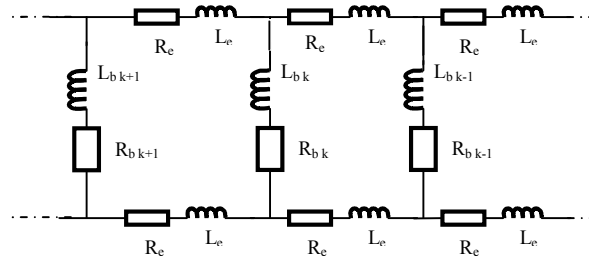


Fig. 2.2. Circuit équivalent de la cage rotorique

On calcule l'inductance principale d'une maille rotorique est la mutuelle entre deux mailles, par les expression suivantes :

$$L_{rp} = \frac{N_{r-1}}{N_r^2} \frac{\mu}{e} 2\pi LR \quad (2.4)$$

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu}{e} 2\pi LR \quad (2.5)$$

L'inductance produite par la bobine statorique de la phase  $m$  induit dans la maille rotorique  $k$  le flux :

$$\phi_{smrk} = \int_{srk} \vec{B}_{sm} d\vec{S}_{rk} = - \int_{\frac{\phi}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}^{\frac{\phi}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}} B_{sm}(\theta') LR d\theta' \quad (2.6)$$

$$\phi_{smrk} = -\frac{2}{\pi} \frac{\mu}{e p} N_s I_{sn} LR \frac{1}{p} \left[ \sin(p\theta') - m \frac{2\pi}{3} \right]_{\frac{\phi}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}^{\frac{\phi}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}} \quad (2.7)$$

Il en résulte que la mutuelle stator-rotor entre la phase statorique  $m$  et la maille rotorique  $k$  est :

$$M_{smrk} = -M_{sr} \cos\left(p\theta - m \frac{2\pi}{3} + ka\right) \quad (2.8)$$

Où 
$$M_{sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu}{e p^2} N_s LR \sin(a/2) \quad (2.9)$$

Et

$$a = p \frac{2\pi}{N_r} : \text{angle entre deux mailles rotoriques.}$$

### II.2.1.2. Mise en équations

Nous utilisons la transformation de Clarke pour passer de grandeurs triphasées statoriques (a, b, c) au grandeurs biphasées (d, q). Et, pour réduire le temps de calcul, on élimine l'angle  $\theta$  de la matrice de couplage, en choisissant le repère lié au rotor.

Après transformation et rotation, l'équation électrique dans le repère rotorique s'écrit sous la forme matricielle suivante :





$$V_{sdq} = R_s I_{sdq} + \omega p \left( \frac{\pi}{2} \right) \phi_{sdq} + \frac{d\phi_{sdq}}{dt} \quad (2.10)$$

Avec

$$\phi_{sdq} = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 \\ 0 & L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} - M_{sr} \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cos ja & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \sin ja & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r0} \\ \cdot \\ I_{rj} \\ \cdot \\ I_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

L'équation électrique relative à la maille  $k$  est :

$$0 = \frac{R_e}{N_r} I_{rk} - R_{b(k-1)} I_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} (I_{rk} - I_e) + R_{bk} I_{bk} + \frac{d\phi_{rk}}{dt} \quad (2.12)$$

Le flux induit dans les mailles rotoriques est donné par la formule (2.13). IL peut être exprimé en fonction des courants de mailles selon la relation (2.14),ci dessous :

$$\phi_{rk} = L_{rp} I_{rk} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} - \frac{3}{2} M_{rr} (I_{ds} \cos ka + I_{qs} \sin ka) + \frac{L_e}{N_r} (I_{rk} + I_{ek}) + L_b (-I_{b(k-1)} + I_{bk}) \quad (2.13)$$

D'où:

$$\phi_{rk} = (L_{rp} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_b) I_{rk} + M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) - \frac{3}{2} M_{rr} (I_{ds} \cos ka + I_{qs} \sin ka) - \frac{L_e}{N_r} I_e \quad (2.14)$$

Avec,  $L_{rp}$  le flux principal,  $M_{rr}$  le flux mutuel avec les autres mailles rotoriques. Les termes en  $L_b$  et  $L_e$  représentent les fuites rotoriques.

Pour  $k$  allant de zéro à  $N_r-1$ , l'équation relative à l'anneau de court-circuit est :

$$L_e \frac{dI_e}{dt} - \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} = -(R_e I_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{rk}) \quad (2.15)$$

Le système complet:

$$[L] \frac{d}{dt} [I] = [V] - [R][I] \quad (2.16)$$

Tel que :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \cdot & \cdot & -M_{sr} \cos ja & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & L_{sc} & \cdot & \cdot & -M_{sr} \sin ja & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & L_t & M_{rr} - L_b & M_{rr} & M_{rr} & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{N_r} & \cdot \\ \cdot & \cdot & M_{rr} - L_b & L_t & M_{rr} - L_b & M_{rr} & M_{rr} & \cdot & \cdot \\ -\frac{3}{2} M_{sr} \cos ka & -\frac{3}{2} M_{sr} \sin ka & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & M_{rr} - L_b & M_{rr} & M_{rr} & M_{rr} - L_b & L_t & -\frac{L_e}{N_r} & \cdot \\ 0 & 0 & -\frac{L_e}{N_r} & \cdot & \cdot & \cdot & -\frac{L_e}{N_r} & L_e & \cdot \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_{sc} & \cdot & \cdot & -M_{sr} \omega \sin ja & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \omega L_{sc} & R_s & \cdot & \cdot & -M_{sr} \omega \cos ja & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & L_{b0} + \frac{2R_e}{N_r} + 2R_{b(N_r-1)} & -R_{b0} & 0 & 0 & -R_{b(N_r-1)} & -\frac{R_e}{N_r} & \cdot \\ \cdot & \cdot & 0 & -R_{b(k-1)} & L_{b(k-2)} + \frac{2R_e}{N_r} + 2R_{b(k-1)} & -R_{bk} & 0 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & -R_{b(N_r-1)} & 0 & 0 & -R_{b(N_r-2)} & L_{b(N_r-2)} + \frac{2R_e}{N_r} + 2R_{b(N_r-1)} & -\frac{R_e}{N_r} & \cdot \\ 0 & 0 & -\frac{R_e}{N_r} & \cdot & \cdot & \cdot & -\frac{R_e}{N_r} & R_e & \cdot \end{bmatrix}$$



$$\text{Avec } L_t = L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b$$

$$[I] = [I_{ds} I_{qs} I_{r0} \dots I_{rj} \dots I_{r(N_r-1)} I_e]^T$$

$$[V] = [-V_{ds} -V_{qs} 0 \dots 0 \dots 0]^T$$

Le couple électromagnétique est obtenu par dérivation de la co-énergie :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p M_{sr} \left\{ I_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{rk} \sin ka - I_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{rk} \cos ka \right\} \quad (2.17)$$

Le modèle de la machine asynchrone établi est, dans la plupart des cas, suffisant pour obtenir de bons résultats dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage, impact de charge...). Néanmoins, ce modèle utilise une inductance magnétisante constante, ce qui sous-entend que le matériau magnétique utilisé pour la conception de la machine est linéaire.

**II.2.2. Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage**

La connexion d'une batterie de condensateurs est nécessaire pour fournir une certaine puissance réactive, (voir figure.2.3). Où, PL présente la puissance réelle de la charge; QL est la puissance réactive à la charge; QG est la puissance réactive pour le générateur et le QE est la puissance réactive de l'excitation.

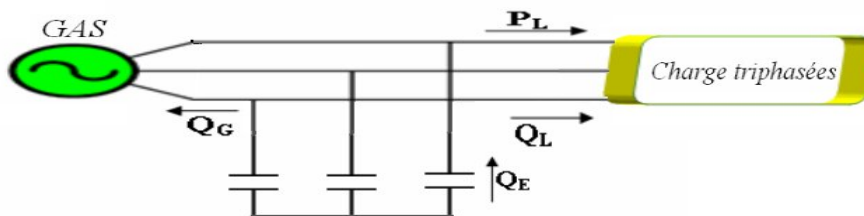


Fig.2.3. Condensateurs de l'auto-excitation de la génératrice asynchrone avec une charge triphasé

Le schéma équivalent simplifié ramené au stator d'une phase de la machine asynchrone est représenté sur la figure 2.4. Le courant I dans l'inductance magnétisante est par conséquent équivalent au courant traversant le condensateur rendant ainsi la résistance R'r/g infinie.

L<sub>f</sub> est l'inductance totales de fuites, M : l'inductance magnétisante, R'<sub>r</sub>: la résistance rotorique ramenée au stator et g le glissement.

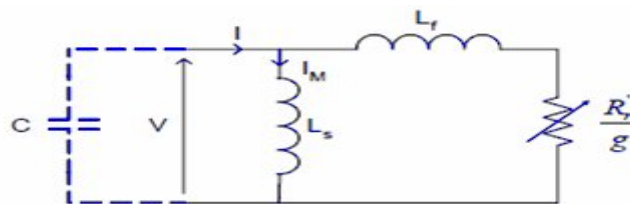


Fig. 2.4. Schéma équivalent simplifié d'une phase de la machine asynchrone ramené au Stator



Si la charge connectée au stator de la machine est purement résistive, le schéma équivalent par phase de l'ensemble machine - capacité d'auto-excitation - charge peut alors être modifié comme indiqué sur la Figure 2.5.b.

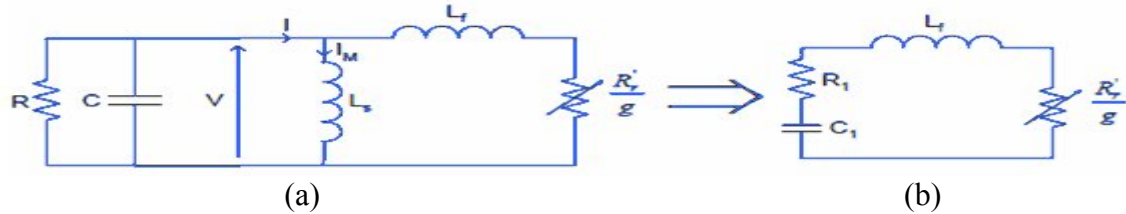


Fig. 2.5. Transformation du schéma équivalent

Dans cette représentation, les éléments  $R_1$  et  $C_1$  peuvent être exprimés en fonction des éléments du schéma équivalent classique (Figure 2.5.a) [29]:

$$R_1 = \frac{R}{1 + \left[ R \left( C \omega_s - \frac{1}{L_s \omega_s} \right) \right]^2} \tag{2.18}$$

$$C_1 = \frac{1 + \left[ R \left( C \omega_s - \frac{1}{L_s \omega_s} \right) \right]^2}{R^2 \left( C \omega_s - \frac{1}{L_s \omega_s} \right)} \tag{2.19}$$

L'auto-amorçage de la machine ne peut avoir lieu que si la puissance apparente qu'elle produit correspond à celle qu'elle absorbe. Pour la partie puissance réactive, on doit alors satisfaire l'égalité suivante :

$$L_f \omega_s - \frac{1}{\omega_s} = 0 \tag{2.20}$$

Soit :

$$L_f = \frac{R^2 L_s (L_s C \omega_s^2 - 1)}{(L_s \omega_s)^2} = F(\omega_s) \tag{2.21}$$

Cette inductance  $L_f$  doit bien évidemment être positive, une condition nécessaire à l'amorçage est donc [30], [31]:

$$L_f C \omega_s^2 > 1 \tag{2.22}$$

Cette condition montre que la valeur minimum conduisant à l'auto-amorçage est fonction de l'inductance cyclique statorique ainsi que de la pulsation rotorique donc du glissement.

La caractéristique  $F(\omega_s)$  est représentée par la figure 2.6 ci-dessous:



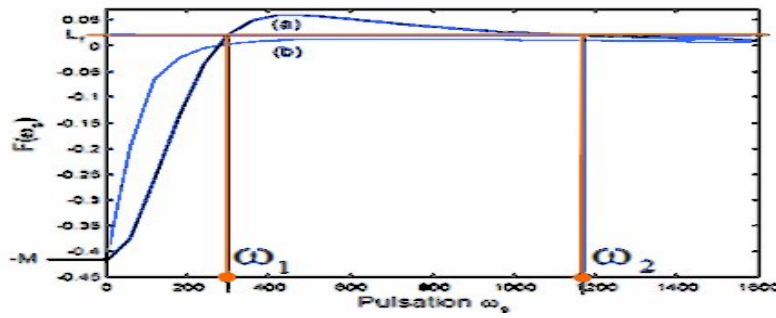


Fig. 2.6. Caractéristique  $F(\omega_s)$

Si  $F(\omega_s)$  est toujours inférieure à  $L_f$  (courbe b), il n'y a pas d'amorçage possible. Dans le cas contraire (courbe a), il existe deux pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  vérifiant l'équation (2.21). En pratique, seule  $\omega_1$  est intéressante car  $\omega_2$  correspond à un fonctionnement instable.

Pour la partie puissance active, on doit satisfaire l'égalité suivante :

$$\frac{R_r'}{g} + R_1 = 0 \tag{2.23}$$

Soit :

$$g = -\frac{R_r'}{R} \left[ 1 + R^2 \left( C \omega_s - \frac{1}{M \omega_s} \right)^2 \right] = -G(\omega_s) \tag{2.24}$$

La caractéristique  $G(\omega_s)$  (Figure 2.7) montre que deux glissements  $g_1$  et  $g_2$  correspondent aux pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  déduites précédemment. On vérifie bien que la pulsation  $\omega_2$  conduit à un glissement trop élevé.

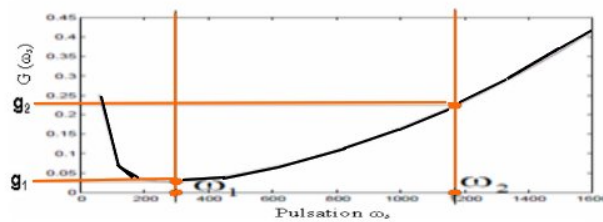


Fig. 2.7. Caractéristique  $G(\omega_s)$

### II.2.3. Prise en compte du phénomène de saturation magnétique

La modélisation est basée sur la simulation du phénomène d'auto-excitation de la machine asynchrone. Puisque, c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement en régime permanent. En effet lorsque la machine est entraînée par un dispositif externe, la présence d'un champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine crée un couple électromagnétique engendrant une force électromotrice sur les enroulements statoriques. La connexion de capacités sur les phases du stator entraîne alors la création d'un courant réactif qui augmente le champ magnétique de la machine et par conséquent les forces électromotrices.



C'est cette réaction cyclique qui permet à la machine d'arriver à un régime permanent situé dans la zone saturée.

La figure 2.8, présente l'évolution de la force électromotrice statorique ainsi que la caractéristique externe du condensateur  $V_c = \frac{I_M}{C \omega_s}$  où  $\omega_s$  est la pulsation des signaux

statoriques) en fonction du courant  $I_M$ , pour un fonctionnement à vide de la machine.

L'interaction des deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent. L'observation de ces courbes montre aisément que deux phénomènes peuvent modifier l'emplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique de magnétisation :

La variation de la capacité d'auto-amorçage qui entraîne une modification de la pente de la droite de charge de la capacité.

La variation de la charge connectée sur la machine qui provoque une variation du glissement.

Ceci rend la résistance  $\frac{R_r'}{g}$  non négligeable et le courant  $I$  est alors partagé entre l'inductance magnétisante et la résistance rotorique.

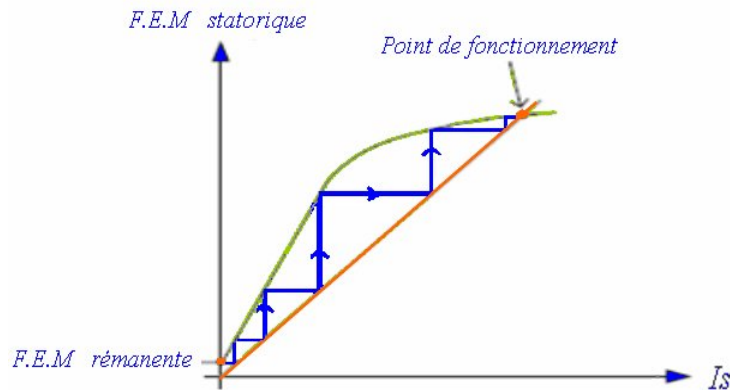


Fig. 2.8 Phénomène d'auto-amorçage

Lorsque le point de fonctionnement est atteint, la machine délivre une tension au stator dont la valeur efficace est constante (Figure 2.9.a). Si l'inductance magnétisante est considérée comme constante et égale à sa valeur en régime non-saturé, la caractéristique de magnétisation ne présente alors pas de coude de saturation et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur. L'auto-amorçage est alors possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie (Figure 2.9.b) [32][33].

**II.2.4. Modélisation de la charge**

Le modèle de la machine étant établi, nous allons établir un modèle des capacités d'auto-excitation et des charges connectées à la machine. Ce modèle est basé sur une transformation "étoile/triangle" de l'ensemble charges - capacités. Il permet d'éviter l'utilisation des composantes symétriques et la décomposition du modèle de la machine en trois sous-systèmes : direct, inverse et homopolaire [34]. Il présente de plus l'avantage d'être complètement indépendant du modèle de la machine.

**II.2.4.1. Transformation étoile-triangle**

La Figure 2.9 (a) représente le système à étudier. Il est constitué d'une machine asynchrone dont le stator est connecté aux capacités d'auto-excitation et d'une charge R-L, triphasées équilibrées, en configuration étoile sans neutre. Ce schéma peut-être transformé en un montage triangle présenté sur la Figure 2.9 (b) dont les éléments sont liés à ceux du schéma étoile par les relations suivantes :

$$C_{ij} = \frac{\overline{C_i C_j}}{\overline{C_i + C_j + C_k}}, \quad Z_{ij} = \frac{\overline{Z_i Z_j} + \overline{Z_i Z_k} + \overline{Z_j Z_k}}{\overline{Z_k}} \tag{2.25}$$

avec :  $i \neq j \neq k ; i, j, k = a, b \text{ ou } c$

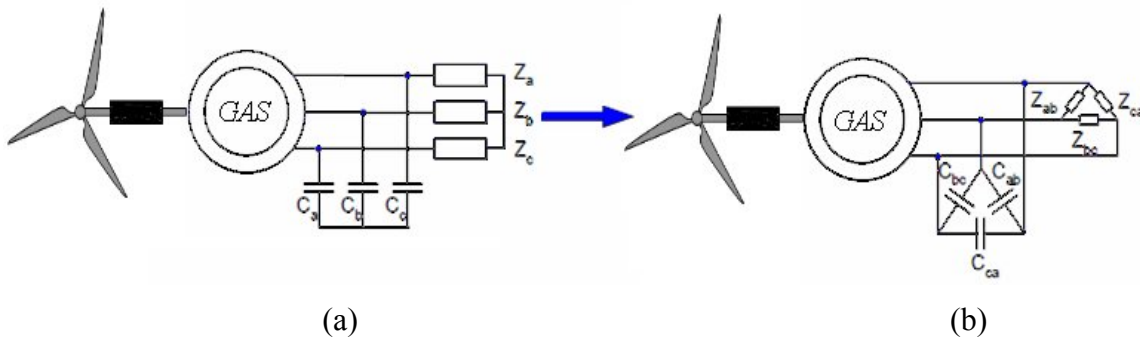


Fig. 2.9. Transformation étoile-triangle de la charge et des condensateurs d'amorçage

L'expression globale de l'impédance  $X_{ij}$  résultant de la mise en parallèle des capacités  $C_{ij}$  et des charges  $Z_{ij}$  s'exprime alors ainsi :

$$C_{ij} = \frac{\overline{C_{ij} Z_{ij}}}{\overline{C_{ij} + Z_{ij}}} \tag{2.26}$$

Avec  $C_{ij}$  : impédance du condensateur placé entre les phases  $i$  et  $j$ .

Après développement et utilisation de la variable de Laplace P, nous obtenons :



$$\overline{X}_{ij} = \frac{\frac{C_k}{P}(C_t)(Z_t)}{\frac{Z_k C_k}{P}(C_t) + (Z_t)} \quad (2.27)$$

Avec

$$C_t = \frac{1}{C_i C_j} + \frac{1}{C_i C_k} + \frac{1}{C_j C_k}$$

$$\overline{Z}_i = R_i + L_i P$$

$$Z_t = \overline{Z}_i \overline{Z}_j + \overline{Z}_i \overline{Z}_k + \overline{Z}_j \overline{Z}_k = R_i R_j + R_i R_k + R_j R_k$$

$$+ (R_i L_j + R_j L_k + R_i L_k + R_k L_i + R_j L_k + R_k L_j)P + (L_i L_j + L_i L_k + L_j L_k)P^2$$

### I.2.4.2. Equations de la charge

Lors du phénomène d'auto-excitation, nous avons vu que l'interaction entre le courant réactif des condensateurs et le flux créé par la rotation du rotor était responsable de l'auto excitation.

Pour reproduire ce phénomène en simulation, il est nécessaire de reconstruire les trois tensions statoriques à partir des courants et du modèle de la charge. Les tensions ainsi établies sont rebouclées à l'entrée du modèle.

Nous avons donc besoin d'établir l'équation différentielle liant les tensions simples aux courants de lignes en fonction de l'expression de la charge. Considérons les différentes tensions et les différents courants comme indiqué sur la Figure 2.10 :

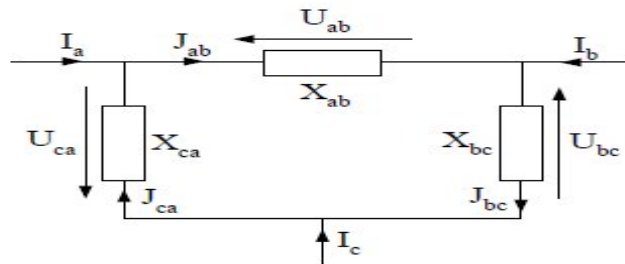


Fig. 2.10. Courants de ligne et de phase et tensions composées

A partir de l'équation (2.21), nous avons :

$$\overline{U}_{ij} = \frac{\frac{C_k}{P}(C_t)(Z_t)}{\frac{Z_k C_k}{P}(C_t) + (Z_t)} \cdot \overline{J}_{ij} \quad (2.28)$$

Soit :



$$\overline{U}_{ij} = \frac{\overline{Z}_k C_k}{P} (C_i) + (Z_i) = \frac{C_k}{P} (C_i) (Z_i) \overline{J}_{ij} \quad (2.29)$$

En posant :

$$\begin{aligned} R_t &= R_i R_j + R_i R_k + R_j R_k \\ RL_t &= R_i L_j + R_j L_k + R_i L_k + R_k L_i + R_j L_k + R_k L_j \\ \overline{Z}_i &= R_i + L_i P \\ L_t &= L_i L_j + L_i L_k + L_j L_k \end{aligned}$$

En remplaçant alors l'opérateur de Laplace par des dérivées, nous obtenons :

$$\begin{aligned} U_{jk} \cdot R_i \cdot C_i \cdot C_t + \frac{dU_{jk}}{dt} \cdot L_i \cdot C_i \cdot C_t + \frac{dU_{jk}}{dt} \cdot R_t + \frac{d^2 U_{jk}}{dt^2} \cdot RL_t + \frac{d^3 U_{jk}}{dt^3} \cdot L_t = \\ C_i \cdot C_t \cdot R_t \cdot J_{jk} + C_i \cdot C_t \cdot RL_t \cdot \frac{dJ_{jk}}{dt} + C_i \cdot C_t \cdot L_t \cdot \frac{d^2 J_{jk}}{dt^2} \end{aligned} \quad (2.30)$$

D'où l'équation différentielle de la charge [35]:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{ij}}{dt} = - \left( \frac{1}{L_k C_k \cdot C_t + R_t} \right) \cdot (R_k C_k \cdot C_t \cdot U_{ij} + RL_t * \frac{d^2 U_{ij}}{dt^2} + L_t * \frac{d^3 U_{ij}}{dt^3}) \\ \left( \frac{1}{L_k C_k \cdot C_t + R_t} \right) \cdot (R_t C_k \cdot C_t \cdot J_{ij} + RL_t \cdot C_k \cdot C_t * \frac{dJ_{ij}}{dt} + L_t \cdot C_k \cdot C_t * \frac{d^2 J_{ij}}{dt^2}) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left( \begin{bmatrix} U_{ab} - U_{ca} \\ U_{bc} - U_{ab} \\ U_{ca} - U_{bc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a + V_b + V_c \\ V_a + V_b + V_c \\ V_a + V_b + V_c \end{bmatrix} \right) \quad (2.32)$$

Les courants de ligne sont reliés aux courants de phase par :

$$\begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left( \begin{bmatrix} I_a - I_b \\ I_b - I_c \\ I_c - I_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{ab} + J_{bc} + J_{ca} \\ J_{ab} + J_{bc} + J_{ca} \\ J_{ab} + J_{bc} + J_{ca} \end{bmatrix} \right) \quad (2.33)$$

### II.2.4.3. Modélisation biphasée de la charge

L'auto-amorçage en charge est le même que celui à vide, sauf que les équations de l'excitation prennent d'autres formes. Cependant, les charges étant connectés en étoile aux bornes de la génératrice, le modèle finalisée de la simulation de la charge après transformation et rotation, est représentée par le model suivant [36] [37] :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} V_{ds} = \frac{1}{C} (i_{ds} - i_{dch}) + \omega_s V_{qs} \\ \frac{d}{dt} i_{dch} = \frac{1}{L_{ch}} (V_{ds} - R_{ch} i_{dch}) + \omega_s i_{qch} \\ \frac{d}{dt} V_{qs} = \frac{1}{C} (i_{qs} - i_{qch}) - \omega_s V_{ds} \\ \frac{d}{dt} i_{qch} = \frac{1}{L_{ch}} (V_{qs} - R_{ch} i_{qch}) - \omega_s i_{dch} \end{cases} \quad (2.34)$$





### II.3. Modèle global de simulation

L'ensemble : turbine éolienne – machine asynchrone – capacités d'excitation – charges avec un structure de commande est présenté sur la Figure 2.11.

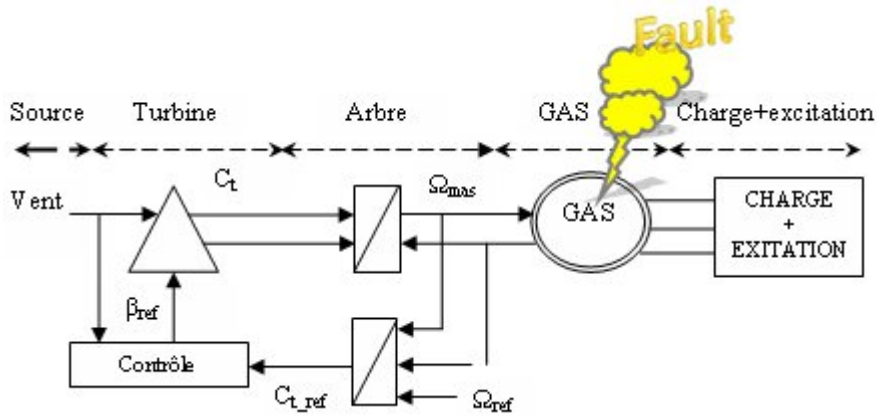


Fig. 2.11. Schématisation du modèle de la simulation

Notons que dans notre cas, la machine fonctionne en génératrice. Les trois courants de phase sont calculés à partir des courants de ligne statoriques. Les valeurs des capacités et des charges R-L (équilibrées) sont utilisées par l'équation (2.34) pour calculer les tensions vues par le stator.

La présence du champ rémanent au démarrage de la machine est un phénomène électromagnétique complexe à modéliser dont les équations établies ici ne tiennent pas compte. Pour simuler ce phénomène et ainsi permettre à l'auto-amorçage d'avoir lieu, une condition initiale non nulle est placée sur un intégrateur de flux du modèle de la machine.

### II.4 Simulations et Interprétations

Dans cette application, nous considérons les données selon le Tableau N°1 :

TABLE 1: DONNEE DE L'APPLICATION.

Vitesse de référence ( $\Omega_{ref}$ )		332.4 rd/s
Vitesse de vent (V)		12 m/s
Capacité d'excitation (C)		88 $\mu F$ , 70 $\mu F$
Résistance de la charge ( $R_{ch}$ )		600 $\Omega$
Inductance de la charge ( $L_{ch}$ )		500mH

◆ 1<sup>er</sup> cas : génératrice sans défaut (sain)

Les courbes de la figure 2.12, présentent les caractéristiques de la génératrice pour un fonctionnement sans défaut rotorique. Elles montrent, la vitesse de rotation (2.12.a) qui après un

période transitoire d'environ 0.8 seconde, elle atteint la valeur permanente en se stabilisant à la vitesse de référence.

Les figures 2.12.b et 2.12.c, présentent respectivement la tension produite et le courant statorique. L'analyse spectrale du courant statorique est représentée par la figure 2.15.a, on trouve que la raie correspondante à la fréquence fondamentale. La figure 2.12.d présente l'évolution du courant de charge.

L'augmentation de la charge à l'instant deux secondes engendre des diminutions aux niveaux de l'ensemble des caractéristiques de la génératrice par rapport à celles observées en fonctionnement à vide. Cela est dû essentiellement à la démagnétisation de la machine et au manque de l'énergie réactive nécessaire d'une part pour la magnétisation de la machine, et d'autre part pour l'alimentation de la charge, en particulier celle inductive qui est consommatrice de l'énergie réactive, et c'est aux condensateurs d'excitation de satisfaire et de partager l'énergie qu'ils produisent entre les deux consommatrices de la puissance réactive.

◆ 2<sup>ème</sup> Cas : génératrice avec défaut de rupture de barres rotoriques

Les résultats des simulations, montrés par la figure 2.13, présentent le comportement de la même chaîne de conversion éolienne avec une rupture des deux barres rotoriques à l'instant  $t=3s$ . Les mêmes conditions de fonctionnement ; un démarrage à vide suivi d'une application de la charge à partir de  $t=2s$ .

À partir d'une simple analyse spectrale (figure 2.15.b) on arrive à distinguer un fonctionnement sain et un fonctionnement défectueux de la génératrice asynchrone tel que d'après l'enveloppe fréquentielle des courants de ligne en régime défectueuse, on constate l'apparition de raies en symétrie autour de la fréquence fondamentale  $f_s$  dont les fréquences sont  $(1 \pm 2k) \cdot f_s$  avec  $k=0, 1, 2, 3, \dots$

◆ 3<sup>ème</sup> Cas : génératrice avec rupture successive de barres rotoriques

La figure 2.14, présentent le comportement lors de rupture des barres successivement à  $t=2.5s, 3.5s, 4.5s, 5.5s$  et  $6.5s$ . Les courants des barres cassées sont représentés dans la figure 2.14.c. A  $t=2.5s$ , nous simulons la rupture de la première barre ( $k=2$ ) ; instantanément, le courant dans cette barre chute pratiquement à zéro (figure 2.14.c) tandis que les courants dans les barres voisines deviennent déséquilibrés. Le courant que conduisait la barre ( $k=2$ ) se répartit alors dans les barres voisines.



Dans le but de montrer l'influence d'une cassure de barre sur le courant statorique, la figure 2.14-e montre le processus d'auto-amorçage lorsque la machine est connectée sur une charge équilibrée. Et, la valeur du courant magnétisant reste constante en régime permanent. En revanche, lorsqu'une rupture de barre est créée sur le rotor, des ondulations, dont la tension statorique, apparaissent nettement sur le courant magnétisant autour de sa valeur moyenne.

L'ondulation, du courant magnétisant influx sur le courant statorique en amplitude et en fréquence. Ceci nuit au fonctionnement global du système puisque ces ondulations peuvent être responsables des oscillations du couple et peuvent générer des perturbations sur l'ensemble des charges connectées à la machine.

Grâce à l'analyse spectrale du courant statorique dans une durée de fonctionnement en régime permanent avec défaut (figure 2.15.c), nous pourrions observer la présence des raies autour de la fréquence fondamentale. La valeur moyenne de courant magnétisant diminue avec l'augmentation de nombre de barre cassées.

◆ 4<sup>ème</sup> Cas : Générateur asynchrone avec défaut de ruptures d'anneaux rotorique

Avec la même chaîne de conversion éolienne et les mêmes conditions de fonctionnement un démarrage avec une rupture des deux anneaux rotoriques. Grâce à la simulation du courant statorique avec défaut, nous pourrions observer aussi la présence des ondulations de celle ci.

Après d'une simple analyse spectrale (figure 2.15.d), on constate l'apparition de raies en symétrie autour de la fréquence fondamentale  $f_s$  dont les fréquences sont  $(1 \pm 2k) \cdot f_s$  avec  $k=0, 1, 2, 3, \dots$



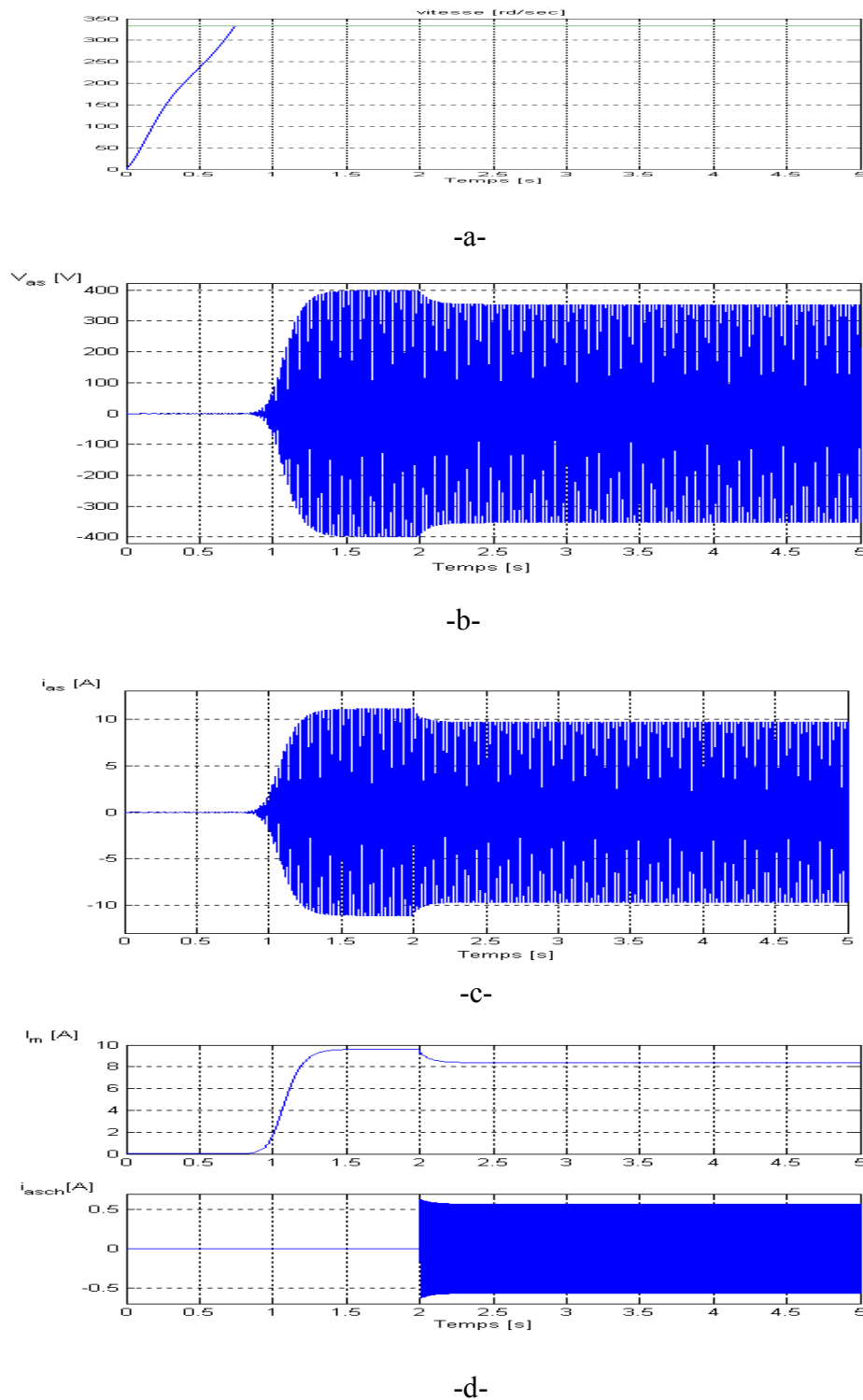
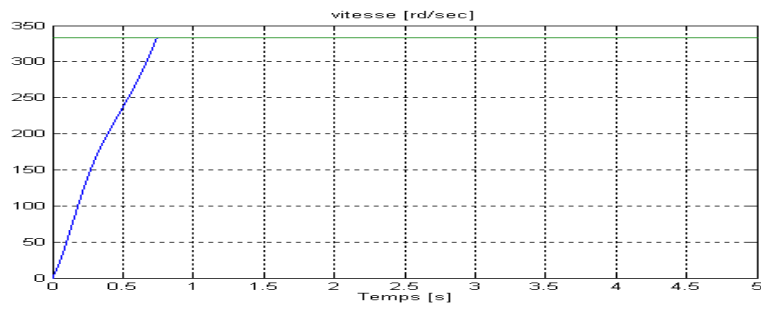
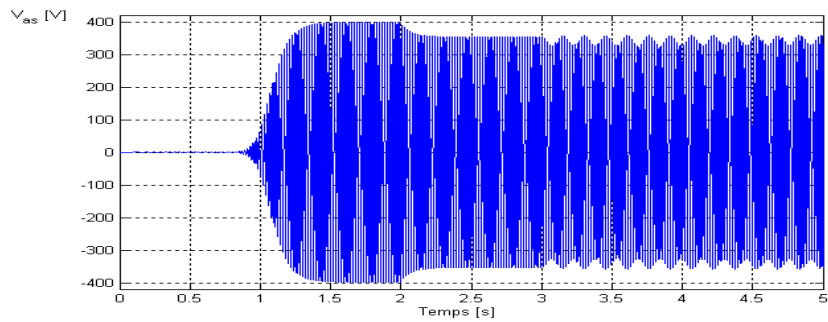


Fig. 2.12. Simulation pour un fonctionnement sain.

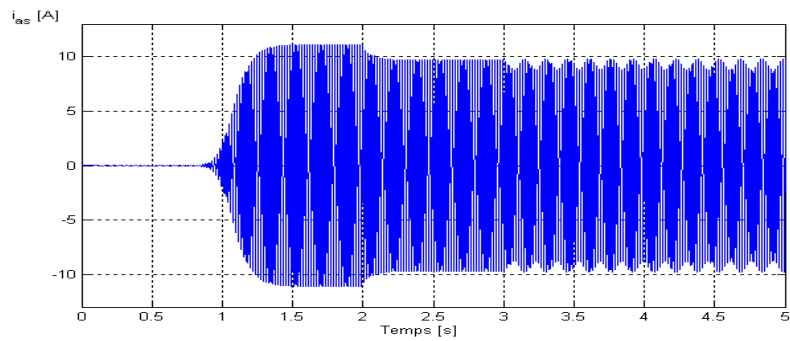




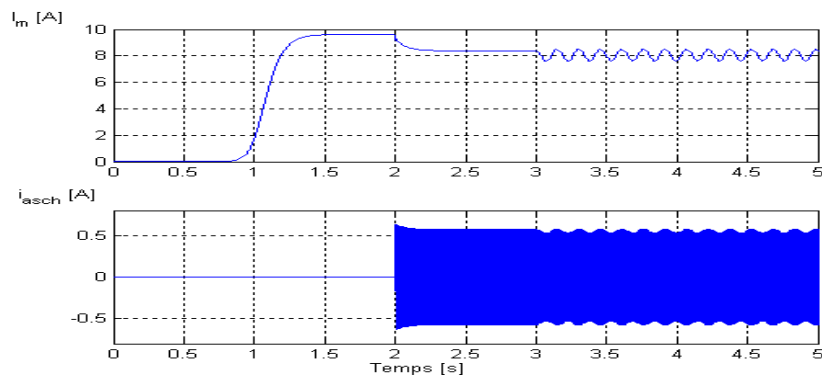
-a-



-b -



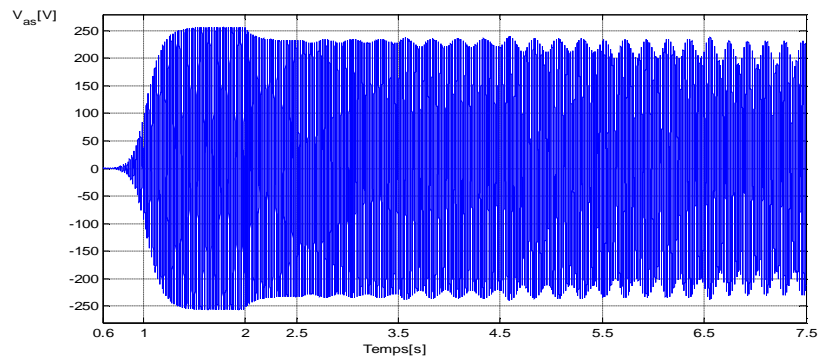
-c -



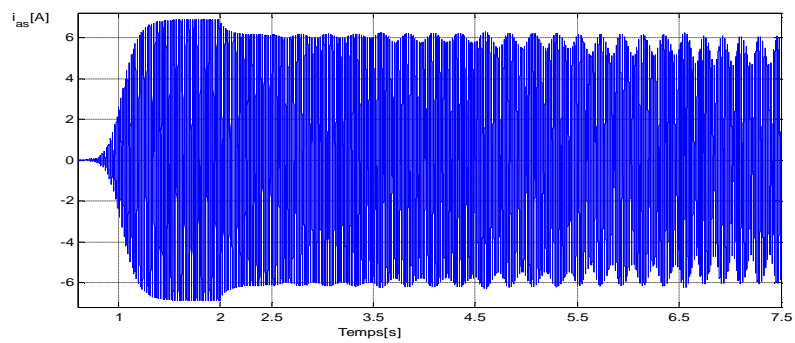
-d -

Fig.2.13. Simulations avec défauts de cassures de barres rotorique.

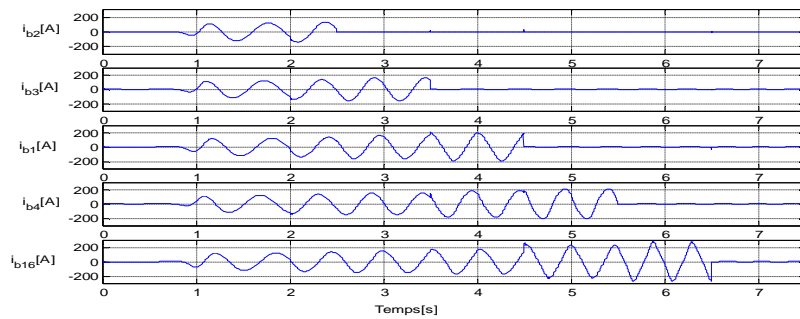




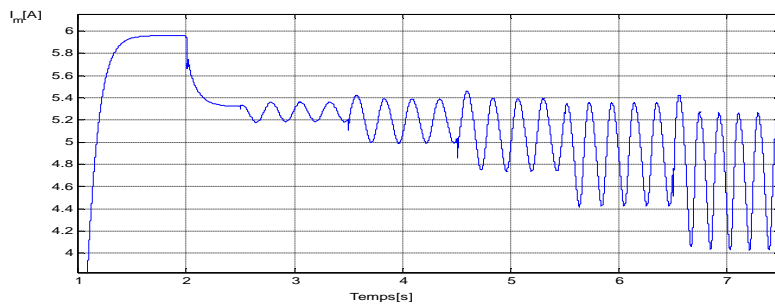
-a-



-b-



-c-



-e-

Fig.2.14. Simulations avec défauts successives de cassures de barres rotoriques



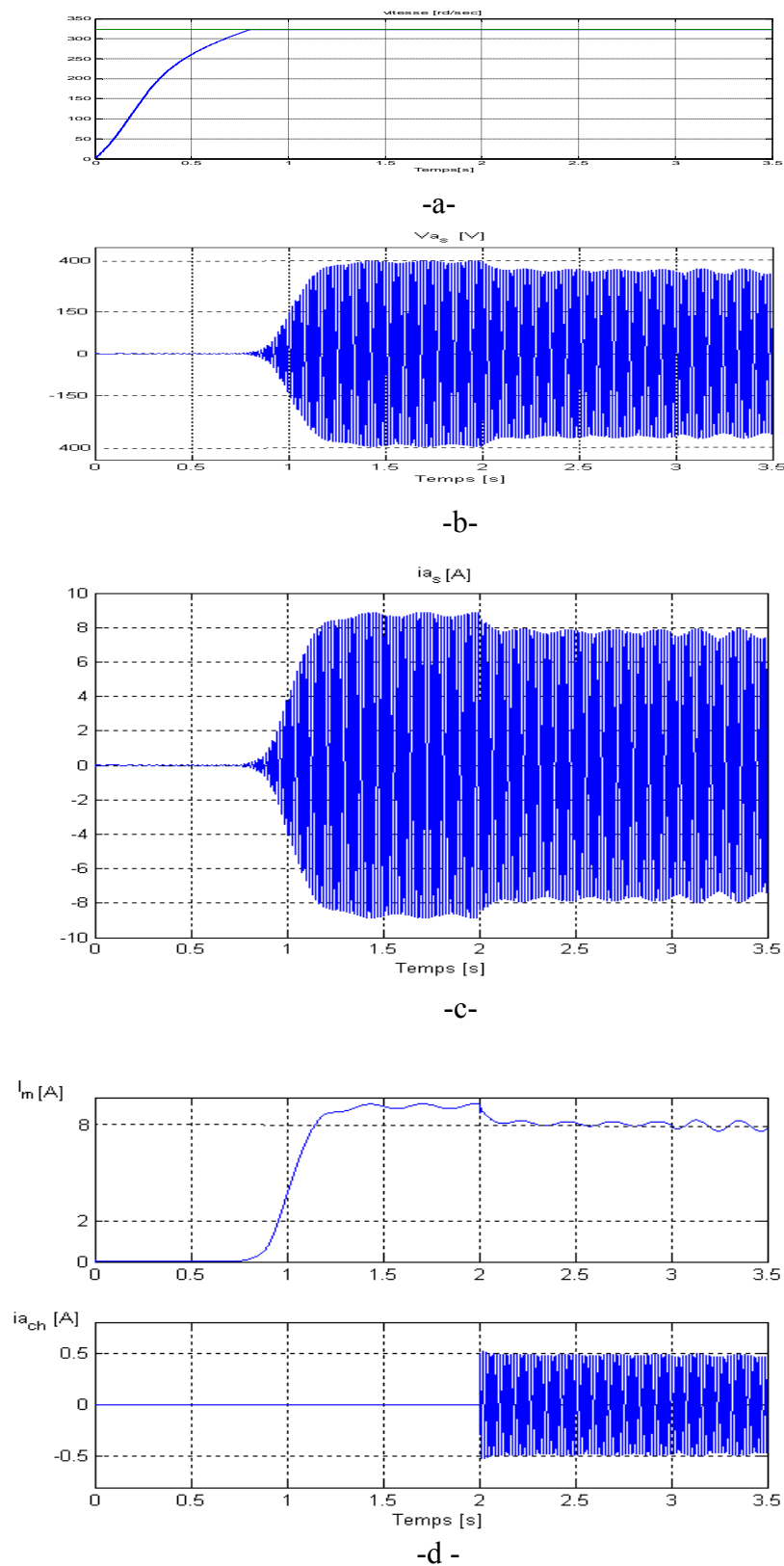
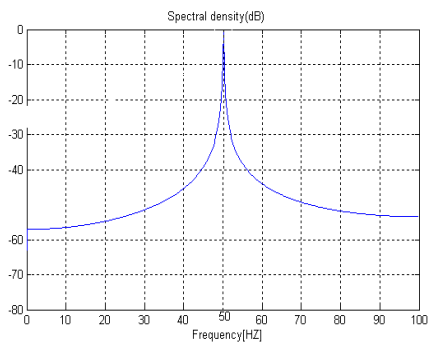
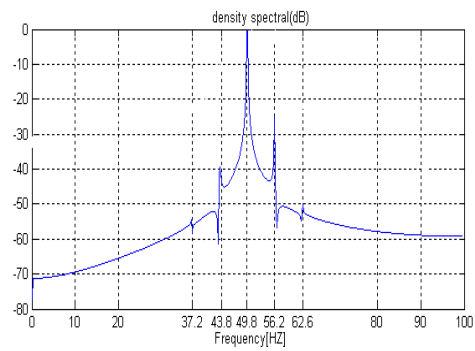


Fig.2.15. Simulation pour le 4<sup>ème</sup> Cas.

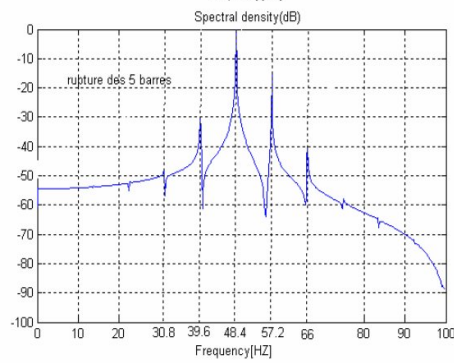
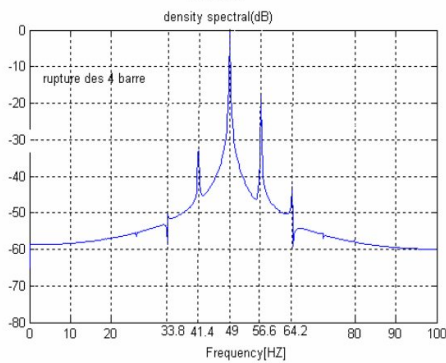
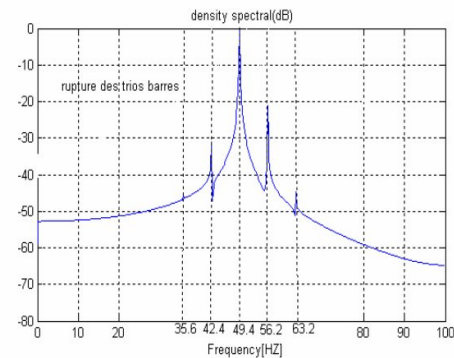
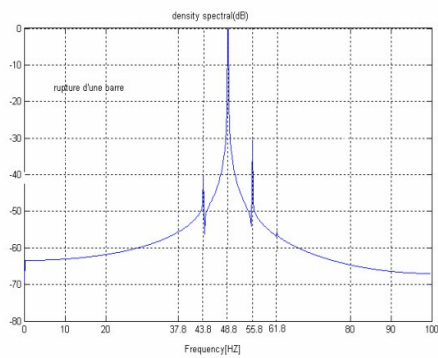




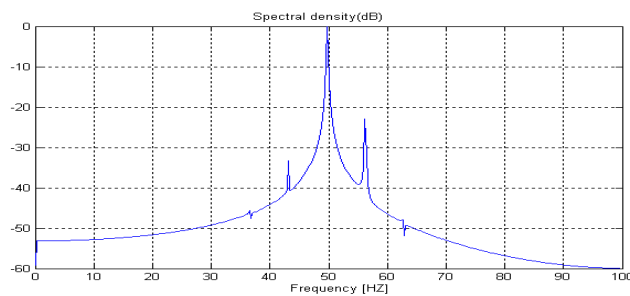
a. Fonctionnement sain.



b. Fonctionnement avec cassure de deux barre.



c. Fonctionnement avec cassure de barres successives.



d. Fonctionnement avec rupture de portion d'anneaux rotorique.

Fig.2.15. Analyses fréquentielles du courant statorique.





## **II.5. Conclusion**

Ce chapitre a permis de dresser un bilan des performances de la machine asynchrone auto-excitée en fonctionnement génératrice autonome. Afin de pouvoir mener cette étude, nous avons simulé le comportement de cette machine sain et avec défauts rotoriques (cassures de barres ou cassure d'anneaux) connectée à sa charge, équilibrée, constituée des capacités d'auto-excitation et des récepteurs passifs triphasés.

L'utilisation de la machine asynchrone auto-excitée dans un système éolien doit prendre en considération les limites de fonctionnement notamment la variation de la tension, celle de la fréquence lors des impacts de charge. Et les éventuels écarts de vitesse dus à l'imprécision du dispositif d'orientation des pales. Les risques de démagnétisation en cas de surcharge de la machine sont également à prendre en compte car ils nécessitent une intervention externe ou une phase de fonctionnement spécifique afin de remagnétiser la machine.



## Chapitre III

### Modélisation et simulation de la MADA en présence de défaillance

#### Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé, ou cette machine est installée dans une chaîne de conversion éoliens, aussi, on étudie son modèle en présence de défauts mécaniques dans son rotor tel que l'excentricité statique et dynamique.

Dans un premier temps nous développerons les modèles analytiques de la génératrice, et de la charge. Ensuite, dans un second temps, nous analyserons le comportement de la génératrice asynchrone à double alimentation dans la chaîne de conversion éolien dans le cas sain et celui d'un fonctionnement en présence de défauts.

#### III.1. Structure de la machine asynchrone à double alimentation

Actuellement, la majorité des projets éoliens reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) [38]. Son circuit statorique est connecté directement à la charge. Un second circuit placé au rotor est également relié à une source d'énergie alternative. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production d'une grande puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion ou est connectée cette génératrice [39].

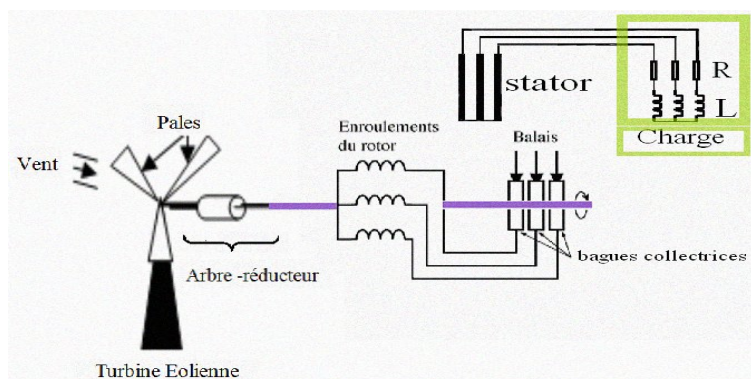


Fig.3.1. Chaîne éolienne basée sur la Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator identique à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (voir figure 3.2).

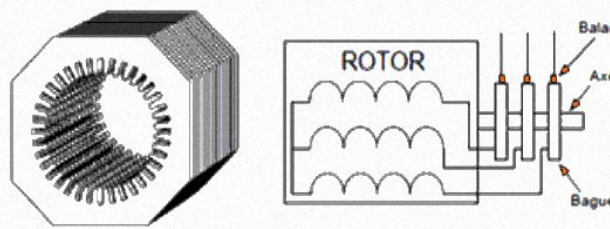


Fig.3.2 –Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, et de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'insertion d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo- synchrone [40].

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative". La figure 3.3 présente les différents enroulements et les flux présents à l'intérieur des structures d'une machine synchrone et d'une MADA [41].

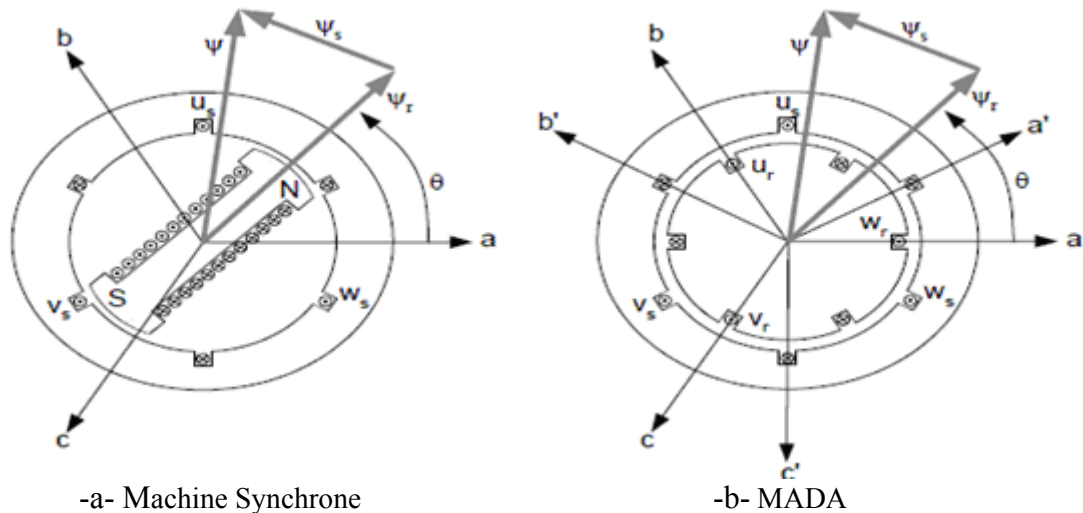


Fig.3.3. Configuration des enroulements et des flux

Le vecteur flux  $\Psi$  présent dans l'entrefer de la machine est la résultante du flux créé par les bobinages statoriques  $\Psi_s$  et du flux rotorique  $\Psi_r$  créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés. La principale divergence entre les deux machines est due à l'établissement du flux rotorique. En effet, dans une machine synchrone classique, la phase du flux rotorique dépend directement de la position mécanique de la roue polaire. Son évolution est donc dépendante de la machine elle-même et de la charge qui lui est accouplée et dépendra donc de la constante de temps mécanique globale du système. En l'absence d'autopilotage, les performances sont par conséquent limitées et des instabilités de fonctionnement peuvent apparaître.

En remplaçant la roue polaire par un circuit triphasé alimenté en alternatif, l'amplitude et la phase du vecteur  $\Psi_r$  sont totalement contrôlables par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux devient indépendante du système mécanique et dépend uniquement de la constante de temps électrique du système.

### III.2. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation incluant des dysfonctionnements

L'objectif est de construire un modèle de simulation qui, partant de la structure physique de la machine, soit capable de prendre en compte différents types de défauts.

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, (voire figure 3.4). se traduisant par des oscillations du couple. Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont

L'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité [42], [43] sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondantes, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système.

Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

### III.2.1. L'excentricité statique

Pour une excentricité purement statique, la première approximation de l'ordre inverse de l'entrefer peut être exprimée en [44] [45],

$$g^{-1}(\phi_s) = a_0 + a_1 \cdot \cos(\phi_s - \alpha) \quad (3.1)$$

Tel que  $a_0 = 1/g_0$  et  $a_1$  et est appelée la facteur de perméabilité à l'excentricité statique,

$$a_1 = \frac{2(1 - \sqrt{1 - \delta_s^2})}{\delta_s \sqrt{1 - \delta_s^2}} \quad (3.2)$$

Où  $\delta_s$  représente le degré d'excentricité statique.

Les distributions des 3-phases statoriques peuvent être écrites comme suit [46],

$$\begin{aligned} N_{as}(\phi_s) &= -\frac{N_s}{2} \sin(\phi_s), & -\pi \leq \phi_s \leq 0 \\ N_{bs}(\phi_s) &= -\frac{N_s}{2} \sin\left(\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right), & -\pi/3 \leq \phi_s \leq 2\pi/3 \\ N_{cs}(\phi_s) &= -\frac{N_s}{2} \sin\left(\phi_s - \frac{4\pi}{3}\right), & \pi/3 \leq \phi_s \leq 4\pi/3 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Compte tenu d'un boucle magnétique fermé (abcd) dans une machine asynchrone à 2-pôles avec excentricité purement statique et de l'unité de courant d'excitation comme le montre la figure 3.4, on peut obtenir l'expression de la loi Ampère suivant,



$$\oint_{abcdS} \vec{H} d\vec{l} = \oint_S \vec{J} d\vec{S} \quad (3.4)$$

$$MMF(0) + MMF(\phi_s) = n(\phi_s) \quad (3.5)$$

On peut représenter l'excentricité statique de la manière suivante :

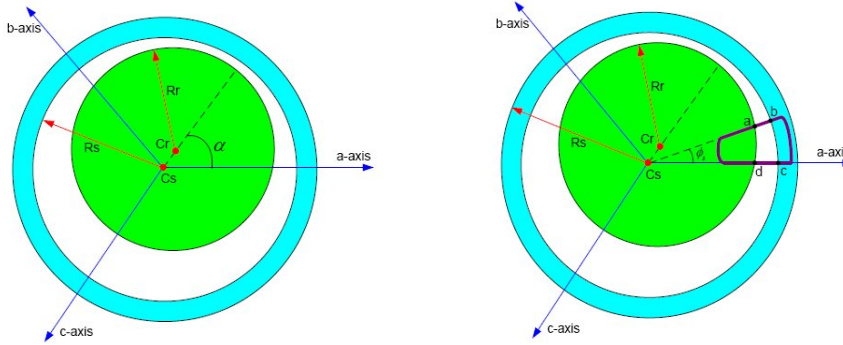


Fig.3.4 –Excentricité statique

Où Cs est le centre du stator et Cr est le centre du rotor.

Rs est le rayon intérieur du stator et Rr est rayon extérieur de rotor.

Avec l'excentricité, montrant une boucle magnétique fermée (abcd).

$$\oint_s \vec{B}(\phi_s) d\vec{S} = 0 \quad (3.6)$$

Sur la base de ces hypothèses, l'équation (3.6) peut être réécrite comme suite,

$$\int_0^{2\pi} \mu_0 .MMF(\phi_s) .g^{-1}(\phi_s) .r.l.d\phi_s = 0 \quad (3.7)$$

Et 
$$\int_0^{2\pi} .MMF(\phi_s) .g^{-1}(\phi_s) .d\phi_s = 0 \quad (3.8)$$

Où  $\mu_0$  est la perméabilité de l'air, r est le rayon intérieur du stator, et l est longueur de la pile axiale de la machine. En multipliant les deux côtés de (3.5) par  $g^{-1}(\Phi_s)$  et l'intégration de 0 à  $2\pi$ , on obtient,

$$\int_0^{2\pi} \{MMF(0) + MMF(\phi_s)\} .g^{-1}(\phi_s) .d\phi_s = \int_0^{2\pi} n(\phi_s) .g^{-1}(\phi_s) .d\phi_s \quad (3.9)$$

En substituant (3.8) dans (3.9),

$$MMF(0) = \frac{\int_0^{2\pi} n(\phi_s) .g^{-1}(\phi_s) .d\phi_s}{\int_0^{2\pi} g^{-1}(\phi_s) .d\phi_s} \quad (3.10)$$

Enfin, à partir de (3.5) et (3.10), la modification des MMF statoriques peut être exprimé comme suite :

$$\begin{cases} MMF_{as}(\phi_s) = \frac{N_s}{2} \left[ \cos(\phi_s) - \frac{\xi_s}{2} \cos(\alpha) \right] \\ MMF_{bs}(\phi_s) = \frac{N_s}{2} \left[ \cos\left(\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\xi_s}{2} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ MMF_{cs}(\phi_s) = \frac{N_s}{2} \left[ \cos\left(\phi_s - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\xi_s}{2} \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \end{cases} \quad (3.11)$$

Où  $\xi_s$  est le coefficient d'excentricité statique.

De même, l'équivalent de modification des MMF dans les 3-phases du rotor dans les mêmes conditions, peut être calculée comme suit,

$$\begin{cases} MMF_{ar}(\phi_r, \theta_r) = \frac{N_r}{2} \left[ \cos(\phi_r) - \frac{\xi_s}{2} \cos(\alpha - \theta_r) \right] \\ MMF_{br}(\phi_r, \theta_r) = \frac{N_r}{2} \left[ \cos\left(\phi_r - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\xi_s}{2} \cos\left(\alpha - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ MMF_{cr}(\phi_r, \theta_r) = \frac{N_r}{2} \left[ \cos\left(\phi_r - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\xi_s}{2} \cos\left(\alpha - \theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \end{cases} \quad (3.12)$$

Où  $N_r$  est le nombre total de spire rotorique par phase,  $\phi_r$  est la mesure de angle mécanique autour de la périphérie extérieure du rotor, et  $\theta_r$  est l'angle mécanique du rotor.

L'inductances mutuelles stator rotor sont calculées en utilisant la méthode à double intégrale ordinaire [47].

$$L_{asas} = L_{1s} + \int_{-\pi}^0 N_{as}(\phi_s) \left\{ \int_{\phi_s}^{\phi_s + \pi} \mu_0 \cdot r \cdot l \cdot MMF_{as}(\xi) g^{-1}(\xi) d\xi \right\} d\phi_s \quad (3.13)$$

Toutes les autres inductances peuvent être calculées de façon similaire. En supposant que le nombre de spires de la phase rotorique a le même nombre de spires que la phase de stator,  $N_s = N_r$ , on peut simplifier la matrice inductance final en utilisant les expressions suivantes,

$$L_{ms} = \left( \frac{N_s}{2} \right)^2 \pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l \cdot a_0 = \left( \frac{N_s}{2} \right) \left( \frac{N_r}{2} \right) \pi \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l \cdot a_0 \quad (3.14)$$

### III.2.2. L'excentricité dynamique

Pour une excentricité dynamique, la première approximation de l'inverse de l'entrefer peut être exprimée comme suite,

$$g^{-1}(\phi_r) = a_0 + a_2 \cdot \cos(\phi_r - \beta) \quad (3.15)$$

Comme dans le cas d'une excentricité statique, la modification des MMF statoriques et rotoriques peut être exprimée ainsi:



$$\begin{cases} MMF_{as} = \frac{N_s}{2} \left[ \cos(\phi_s) - \frac{\xi_d}{2} \cos(\theta_r + \beta) \right] i_{as} \\ MMF_{bs} = \frac{N_s}{2} \left[ \cos\left(\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\xi_d}{2} \cos\left(\theta_r + \beta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] i_{bs} \\ MMF_{cs} = \frac{N_s}{2} \left[ \cos\left(\phi_s - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\xi_d}{2} \cos\left(\theta_r + \beta - \frac{4\pi}{3}\right) \right] i_{cs} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} MMF_{ar} = \frac{N_r}{2} \left[ \cos(\phi_r) - \frac{\xi_d}{2} \cos(\beta) \right] i_{ar} \\ MMF_{br} = \frac{N_r}{2} \left[ \cos\left(\phi_r - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\xi_d}{2} \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] i_{br} \\ MMF_{cr} = \frac{N_r}{2} \left[ \cos\left(\phi_r - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\xi_d}{2} \cos\left(\beta - \frac{4\pi}{3}\right) \right] i_{cr} \end{cases} \quad (3.17)$$

Où  $\xi_d$  est le coefficient d'excentricité dynamique.

### III.2.3. L'excentricité mixte

Dans le cas d'excentricité mixte [48] [49], on a considéré simultanément les deux défauts d'excentricités statique et dynamique dont la fonction correspondante est présentée par l'expression suivante :

$$g^{-1}(\phi_s, \phi_r) = a_0 + a_1 \cdot \cos(\phi_s - \beta) + a_2 \cdot \cos(\phi_r - \beta) \quad (3.18)$$

La version modifiée du MMF des trois phases statorique et rotorique avec une mixte excentricité du rotor sont essentiellement dues à la somme de ceux d'une excentricité purement statique et excentricité purement dynamique,

$$\begin{cases} MMF_{as} = \frac{N_s}{2} \left[ \cos(\phi_s) - \frac{\xi_s}{2} \cos(\alpha) - \frac{\xi_d}{2} \cos(\theta_r + \beta) \right] i_{as} \\ MMF_{bs} = \frac{N_s}{2} \left[ \cos\left(\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\xi_s}{2} \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\xi_d}{2} \cos\left(\theta_r + \beta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] i_{bs} \\ MMF_{cs} = \frac{N_s}{2} \left[ \cos\left(\phi_s - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\xi_s}{2} \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\xi_d}{2} \cos\left(\theta_r + \beta - \frac{4\pi}{3}\right) \right] i_{cs} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$\begin{cases} MMF_{ar} = \frac{N_r}{2} \left[ \cos(\phi_r) - \frac{\xi_s}{2} \cos(\alpha - \theta_r) - \frac{\xi_d}{2} \cos(\beta) \right] i_{ar} \\ MMF_{br} = \frac{N_r}{2} \left[ \cos\left(\phi_r - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\xi_s}{2} \cos\left(\alpha - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\xi_d}{2} \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] i_{br} \\ MMF_{cr} = \frac{N_r}{2} \left[ \cos\left(\phi_r - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\xi_s}{2} \cos\left(\alpha - \theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\xi_d}{2} \cos\left(\beta - \frac{4\pi}{3}\right) \right] i_{cr} \end{cases} \quad (3.20)$$

Les matrices d'inductances pour une excentricité mixte s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

La matrice inductance des phases statoriques est:





$$\begin{aligned}
[L_{ss}] = & \begin{bmatrix} L_{1s} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} & 0 \\ 0 & 0 & L_{1s} \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix} - \frac{\xi_s^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} a_1^2 & a_2 a_1 & a_3 a_1 \\ a_1 a_2 & a_2^2 & a_3 a_2 \\ a_1 a_3 & a_3 a_2 & a_3^2 \end{bmatrix} \\
& - \frac{\xi_d^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} b_1^2 & b_2 b_1 & b_3 b_1 \\ b_1 b_2 & b_2^2 & b_3 b_2 \\ b_1 b_3 & b_3 b_2 & b_3^2 \end{bmatrix} - \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} a_1 b_1 & a_2 b_1 & a_3 b_1 \\ a_1 b_2 & a_2 b_2 & a_3 b_2 \\ a_1 b_3 & a_2 b_3 & a_3 b_3 \end{bmatrix} - \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} a_1 b_1 & a_1 b_2 & a_1 b_3 \\ a_2 b_1 & a_2 b_2 & a_2 b_3 \\ a_3 b_1 & a_3 b_2 & a_3 b_3 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (3.21)$$

Tel que :

$$\begin{aligned}
a_1 &= \cos(\alpha), & a_2 &= \cos(\alpha - 2\pi/3), & a_3 &= \cos(\alpha - 4\pi/3) \\
b_1 &= \cos(\theta_r + \beta), & b_2 &= \cos(\theta_r + \beta - 2\pi/3), & b_3 &= \cos(\theta_r + \beta - 4\pi/3)
\end{aligned}$$

La matrice des inductances mutuelles  $[L_{sr}]$  mixed entre les trois phases statoriques et les trois phases rotoriques se met sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{aligned}
[L_{sr}] = & L_{ms} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_3 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix} - \frac{\xi_s^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} a_1 d_1 & a_1 d_2 & a_1 d_3 \\ a_2 d_1 & a_2 d_2 & a_2 d_3 \\ a_3 d_1 & a_3 d_2 & a_3 d_3 \end{bmatrix} - \frac{\xi_d^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} b_1 e_1 & b_1 e_2 & b_1 e_3 \\ b_2 e_1 & b_2 e_2 & b_2 e_3 \\ b_3 e_1 & b_3 e_2 & b_3 e_3 \end{bmatrix} \\
& - \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} d_1 b_1 & d_2 b_1 & d_3 b_1 \\ d_1 b_2 & d_2 b_2 & d_3 b_2 \\ d_1 b_3 & d_2 b_3 & d_3 b_3 \end{bmatrix} - \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} a_1 e_1 & a_1 e_2 & a_1 e_3 \\ a_2 e_1 & a_2 e_2 & a_2 e_3 \\ a_3 e_1 & a_3 e_2 & a_3 e_3 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (3.22)$$

Tel que :

$$\begin{aligned}
c_1 &= \cos(\theta_r), & c_2 &= \cos(\theta_r - 2\pi/3), & c_3 &= \cos(\theta_r - 4\pi/3) \\
d_1 &= \cos(\alpha - \theta_r), & d_2 &= \cos(\alpha - \theta_r - 2\pi/3), & d_3 &= \cos(\alpha - \theta_r - 4\pi/3) \\
e_1 &= \cos(\beta), & e_2 &= \cos(\beta - 2\pi/3), & e_3 &= \cos(\beta - 4\pi/3)
\end{aligned}$$

La matrice des inductances du rotor est :

$$\begin{aligned}
[L_{rr}] = & \begin{bmatrix} L_{1r} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1r} & 0 \\ 0 & 0 & L_{1r} \end{bmatrix} + L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix} - \frac{\xi_s^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} d_1^2 & d_2 d_1 & d_3 d_1 \\ d_1 d_2 & a_2^2 & d_3 d_2 \\ d_1 d_3 & d_3 d_2 & d_3^2 \end{bmatrix} \\
& - \frac{\xi_d^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} e_1^2 & e_2 e_1 & e_3 e_1 \\ e_1 e_2 & e_2^2 & e_3 e_2 \\ e_1 e_3 & e_3 e_2 & e_3^2 \end{bmatrix} - \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} d_1 e_1 & d_2 e_1 & d_3 e_1 \\ d_1 e_2 & d_2 e_2 & d_3 e_2 \\ d_1 e_3 & d_2 e_3 & d_3 e_3 \end{bmatrix} - \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} d_1 e_1 & d_1 e_2 & d_1 e_3 \\ d_2 e_1 & d_2 e_2 & d_2 e_3 \\ d_3 e_1 & d_3 e_2 & d_3 e_3 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned}
d[L_{ss}]/d\theta_r = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\xi_s^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} k_{11}^2 & k_{22} k_{11} & k_{33} k_{11} \\ k_{11} k_{22} & k_{22}^2 & k_{33} k_{22} \\ k_{11} k_{33} & k_{33} k_{22} & k_{33}^2 \end{bmatrix} \\
& + \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} a_1 b_{11} & a_2 b_{11} & a_3 b_{11} \\ a_1 b_{22} & a_2 b_{22} & a_3 b_{22} \\ a_1 b_{33} & a_2 b_{33} & a_3 b_{33} \end{bmatrix} + \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} a_1 b_{11} & a_1 b_{22} & a_1 b_{33} \\ a_2 b_{11} & a_2 b_{22} & a_2 b_{33} \\ a_3 b_{11} & a_3 b_{22} & a_3 b_{33} \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned}
d[L_{sr}]/d\theta_r = & d[L_{rs}^T]/d\theta_r = -L_{ms} \begin{bmatrix} c_{11} & c_{22} & c_{33} \\ c_{33} & c_{11} & c_{22} \\ c_{22} & c_{33} & c_{11} \end{bmatrix} - \frac{\xi_s^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} a_1 d_{11} & a_1 d_{22} & a_1 d_{33} \\ a_2 d_{11} & a_2 d_{22} & a_2 d_{33} \\ a_3 d_{11} & a_3 d_{22} & a_3 d_{33} \end{bmatrix} \\
& + \frac{\xi_d^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} b_{11} e_1 & b_{11} e_2 & b_{11} e_3 \\ b_{22} e_1 & b_{22} e_2 & b_{22} e_3 \\ b_{33} e_1 & b_{33} e_2 & b_{33} e_3 \end{bmatrix} - \frac{\xi_s \xi_d}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ s_3 & s_1 & s_2 \\ s_2 & s_3 & s_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (3.25)$$



Tel que :

$$\begin{aligned}
 k_{11} &= \sin(2\theta_r + 2\beta), & k_{22} &= \cos(2\theta_r + 2\beta - 2\pi/3), & k_{33} &= \cos(2\theta_r + 2\beta - 4\pi/3) \\
 b_{11} &= \sin(\theta_r + \beta), & b_{22} &= \sin(\theta_r + \beta - 2\pi/3), & b_{33} &= \sin(\theta_r + \beta - 4\pi/3) \\
 c_{11} &= \sin(\theta_r), & c_{22} &= \sin(\theta_r - 2\pi/3), & c_{33} &= \sin(\theta_r - 4\pi/3) \\
 d_{11} &= \sin(\alpha - \theta_r), & d_{22} &= \sin(\alpha - \theta_r - 2\pi/3), & d_{33} &= \sin(\alpha - \theta_r - 4\pi/3) \\
 s_1 &= \sin(\alpha - \beta - 2\theta_r), & s_2 &= \sin(\alpha - \beta - 2\theta_r - 2\pi/3), & s_3 &= \sin(\alpha - \beta - 2\theta_r - 4\pi/3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d[L_{rr}]/d\theta_r &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \frac{\xi_s^2}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} s_{11} & s_{22} & s_{33} \\ s_{22} & s_{33} & s_{11} \\ s_{33} & s_{11} & s_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &+ \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} d_{11}e_1 & d_{22}e_1 & d_{33}e_1 \\ d_{11}e_2 & d_{22}e_2 & d_{33}e_2 \\ d_{11}e_3 & d_{22}e_3 & d_{33}e_3 \end{bmatrix} + \frac{\xi_d \xi_s}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} d_{11}e_1 & d_{11}e_2 & d_{11}e_3 \\ d_{22}e_1 & d_{22}e_2 & d_{22}e_3 \\ d_{33}e_1 & d_{33}e_2 & d_{33}e_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (3.26)$$

Ainsi que :  $s_{11} = \cos(2\alpha - 2\theta_r)$ ,  $s_{22} = \cos(2\alpha - 2\theta_r - 2\pi/3)$ ,  $s_{33} = \cos(2\alpha - 2\theta_r - 4\pi/3)$

### III.3. Model de simulation pour la machine asynchrone à double alimentation

La représentation schématique dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation de la machine asynchrone est donnée sur la figure suivant.

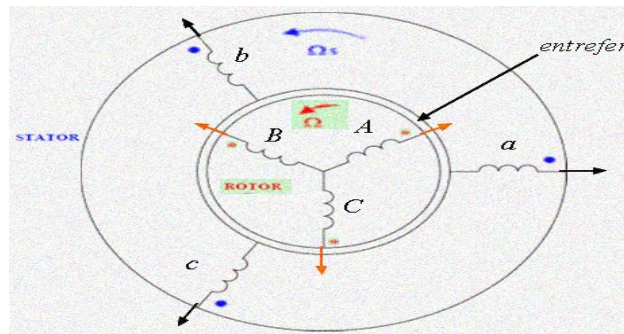


Fig. 3.5 : Représentation schématique simplifiée d'une MADA

La forme générale de l'équation des tensions de la génératrice asynchrone à double alimentation est obtenue par la somme de la chute ohmique et de la chute inductive due au flux total qui traverse l'enroulement.

$$\begin{bmatrix} V_{as} - V_{s-n} \\ V_{bs} - V_{s-n} \\ V_{cs} - V_{s-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} - V_{r-n} \\ V_{br} - V_{r-n} \\ V_{cr} - V_{r-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Tel que :

$$\begin{aligned} V_{s-n} &= -\frac{1}{3} \left( \frac{d}{dt} \psi_{as} + \frac{d}{dt} \psi_{bs} + \frac{d}{dt} \psi_{cs} \right) \\ V_{r-n} &= -\frac{1}{3} \left( \frac{d}{dt} \psi_{ar} + \frac{d}{dt} \psi_{br} + \frac{d}{dt} \psi_{cr} \right) \end{aligned} \quad (3.29)$$

L'équation de flux est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \psi_{abcs} \\ \psi_{acbr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{sr}]^T & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{acbr} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Avec:

$$\begin{aligned} i_{as} + i_{bs} + i_{cs} &= 0 \\ i_{ar} + i_{br} + i_{cr} &= 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

Le couple électromagnétique se calcule en dérivant cette dernière par rapport à la position  $\Theta$  que prend le rotor vis à vis du stator. L'expression du couple électromagnétique ( $C_e$ ) peut finalement être déterminée grâce à la relation ci-dessous

$$C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{acbr} \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{sr}]^T & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{acbr} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Où,  $[L_{ss}]$ ,  $[L_{rr}]$  et  $[L_{sr}]$ ,  $[L_{rs}]$  sont respectivement les matrices des inductances propres et mutuelles des bobinages statoriques et rotoriques.

L'équation de mouvement du rotor de la machine asynchrone à double alimentation est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} C_r - C_{em} &= J \frac{d\omega_r}{dt} + f\omega_r \\ C_{acc} &= J \frac{d\omega_r}{dt} + f\omega_r \end{aligned} \quad (3.33)$$

Avec  $C_{acc}$ ,  $C_{em}$  et  $C_r$  désignent respectivement les couples d'accélération, électromagnétique et extérieur (ou résistant). ( $\omega_r$ ) est la vitesse de rotation mécanique, et  $f$  et  $J$  sont les caractéristiques mécaniques de la machine (respectivement le coefficient de frottement visqueux et le moment d'inertie des masses tournantes).

Le modèle finalisé de la simulation de la génératrice asynchrone à double alimentation Après le calcul des matrices des inductances du rotor et de stator avec La matrice des inductances mutuelles stator- rotor, est représentée par le modèle matricielle suivant [50] :

$$\bar{V}_{abcs} = r_s [E] \bar{i}_{abcs} + [L_{ss}] p \bar{i}_{abcs} + p [L_{ss}] \bar{i}_{abcs} + [L_{sr}] p \bar{i}_{acbr} + p [L_{sr}] \bar{i}_{acbr} \quad (3.34)$$

$$\bar{V}_{acbr} = r_r [E] \bar{i}_{acbr} + [L_{rr}] p \bar{i}_{acbr} + p [L_{rr}] \bar{i}_{acbr} + [L_{sr}]^T p \bar{i}_{abcs} + p [L_{sr}]^T \bar{i}_{abcs} \quad (3.35)$$

Tel que :

$$[E] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$



### III.4. Modélisation de la Charge

Les charges étant connectées aux bornes de la génératrice, le système d'équations dans le repère triphasé dans le cas ou les charges étant connectées en étoile sans neutre est s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} U_{ab} = R_{ch} i_{as} + L_{ch} \frac{di_{as}}{dt} - R_{ch} i_{bs} - L_{ch} \frac{di_{bs}}{dt} \\ U_{bc} = R_{ch} i_{bs} + L_{ch} \frac{di_{bs}}{dt} - R_{ch} i_{cs} - L_{ch} \frac{di_{cs}}{dt} \\ U_{ca} = R_{ch} i_{cs} + L_{ch} \frac{di_{cs}}{dt} - R_{ch} i_{as} - L_{ch} \frac{di_{as}}{dt} \end{cases} \quad (3.37)$$

Tel que

$$\begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} U_{ab} & -U_{ca} \\ U_{bc} & -U_{ab} \\ U_{ca} & -U_{bc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{as} + V_{bs} + V_{ca} \\ V_{as} + V_{bs} + V_{ca} \\ V_{as} + V_{bs} + V_{ca} \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

### III.5. Simulation et Interprétation

Dans cette application, nous considérons les données selon le Tableau 3.1.

TABLE 3.1: DONNEES DE L'APPLICATION.

Vitesse de référence	$(\Omega_{réf})$	301.6 rd/s
Vitesse de vent	$(V)$	12 m/s
fréquence de la tension rotorique		2 Hz.
Résistance de la charge	$(R_{ch})$	200 $\Omega$
Inductance de la charge	$(L_{ch})$	500mH

♦ **1<sup>ère</sup> cas : génératrice asynchrone à double alimentation sain.**

Les courbes de la figure 3.6, présentent les caractéristiques de la génératrice pour un fonctionnement sain. Elles montrent, la vitesse de rotation Figure 3.6.a qui après un période transitoire d'environ 0.7 seconde, elle atteint la valeur permanente en se stabilisant à la vitesse de référence.

Au démarrage, la tension Figure 3.6.b et le courant Figure 3.6.c générés croient d'une façon exponentielle pendant quelques secondes, puis ils se stabilisent respectivement à 550 V et à 6A en régimes totalement établis à  $t = 1.2s$ , puis poursuivent leurs évolutions avec des amplitudes constantes sachant que la fréquence est maintenue constante, à  $t = 2.5s$  nous augmentent la vitesse de référence à 360 rd/s ,la vitesse de rotation suivie bien la référence, la tension et le courant statorique augment en amplitude et en fréquence. Les figures précédentes montrent l'évolution de la tension et du courant rotorique de la GADA. L'allure de la tension rotorique montre que celle-ci évolue d'une façon périodique de fréquence de 2 Hz. L'allure du courant rotorique se stabilise dès la deuxième alternance. Puis il évolue d'une manière



sinusoïdale d'amplitude constante égale approximativement à 7A, et de fréquence identique à celle de la tension rotorique. À l'instant  $t=3s$  nous augmentant l'amplitude de la tension rotorique à 50V, instantanément la tension statorique augment à une valeur de 1000V, et les courant statorique et rotorique augmentent respectivement à des valeur de 10 et 11A.

, la Figure 3.6.d présente l'évolution de couple électromagnétique qui après un période transitoire d'environ 0.7 seconde, elle atteint la valeur permanente en se stabilisant à une couple de 19N.m, puis à  $t=3.5s$  il augmentent à 50Nm à cause de l'augmentation de la tension rotorique.

Grâce à l'analyse spectrale du courant statorique pendant le fonctionnement en deuxième vitesse de rotation, en régime permanent, nous pourrons observer la variation de la fréquence fondamentale de courant statorique, elle atteint la valeur de 60Hz.

♦ 2<sup>ème</sup> cas : génératrice asynchrone à double alimentation avec défaut de d'excentricité statique.

Les résultats de simulations, montrés par la figure 3.7, présentent le comportement de la même chaîne de conversion avec défaut de d'excentricité statique ( $\xi_s=0.4$ ), de rotor de la GADA à l'instant  $t=2s$ .

Dans le but de déterminer les limites de fonctionnement du système, nous avons réalisé des essais dans la même chaîne de conversion avec un défaut d'excentricité statique du rotor de la GADA à l'instant  $t=2s$ . En revanche, lorsqu'une excentricité statique est créé sur le rotor une ondulation, dont les tensions (Figure 3.7.b) et courant statorique (Figure 3.7.c), apparaissent nettement sur le courant de la charge. Ceci nuit au fonctionnement global du système puisque ces ondulations peuvent être responsables d'oscillations de couple de la machine (Figure 3.7.d) et peuvent générer des perturbations sur la machine asynchrone lui-même ou sur la turbine.

L'analyse spectrale du courant statorique est représentée par la figure 3.10.d, nous pourrons observer la présence des raies.

♦ 3<sup>ème</sup> Cas : génératrice asynchrone à double alimentation avec défaut de d'excentricité dynamique.

Les résultats de simulations, montrés par la figure 3.8, présentent le comportement de la même chaîne de conversion avec défaut de d'excentricité dynamique à l'instant  $t=2s$  de rotor de la GADA, avec ( $\xi_d=0.4$ ).



- Au démarrage, les mêmes essais de simulation que le 2<sup>ème</sup> cas par ce que la charge sont équilibrés. En revanche, lorsqu'un défaut de d'excentricité dynamique est créé sur le rotor des ondulations, dont les tensions et courant statorique, apparaissent nettement sur le courant de la charge.

Avec l'application de l'analyse spectrale sur le courant statorique (figure 3.10.e), nous pourrions observer la présence des raies autour de la fréquence fondamentale.

◆ 4<sup>ème</sup> Cas : génératrice asynchrone a double alimentation avec défaut de d'excentricité mixte

Les résultats de simulation de la tension rotorique avec défaut d'excentricité mixte avec ( $\xi_d=0.4$ ,  $\xi_r=0.4$ ), présentent par la figure 3.9.c, après ce défaut a  $t=2s$  il y a une perturbation sur les courant et tension statorique et rotorique. Ce type de défaut crée une perturbation sur la machine asynchrone à double alimentation et nuit au fonctionnement global du système.

La figure 3.10.f présente le continu spectral de courant statorique, nous pourrions observer la présence des raies.

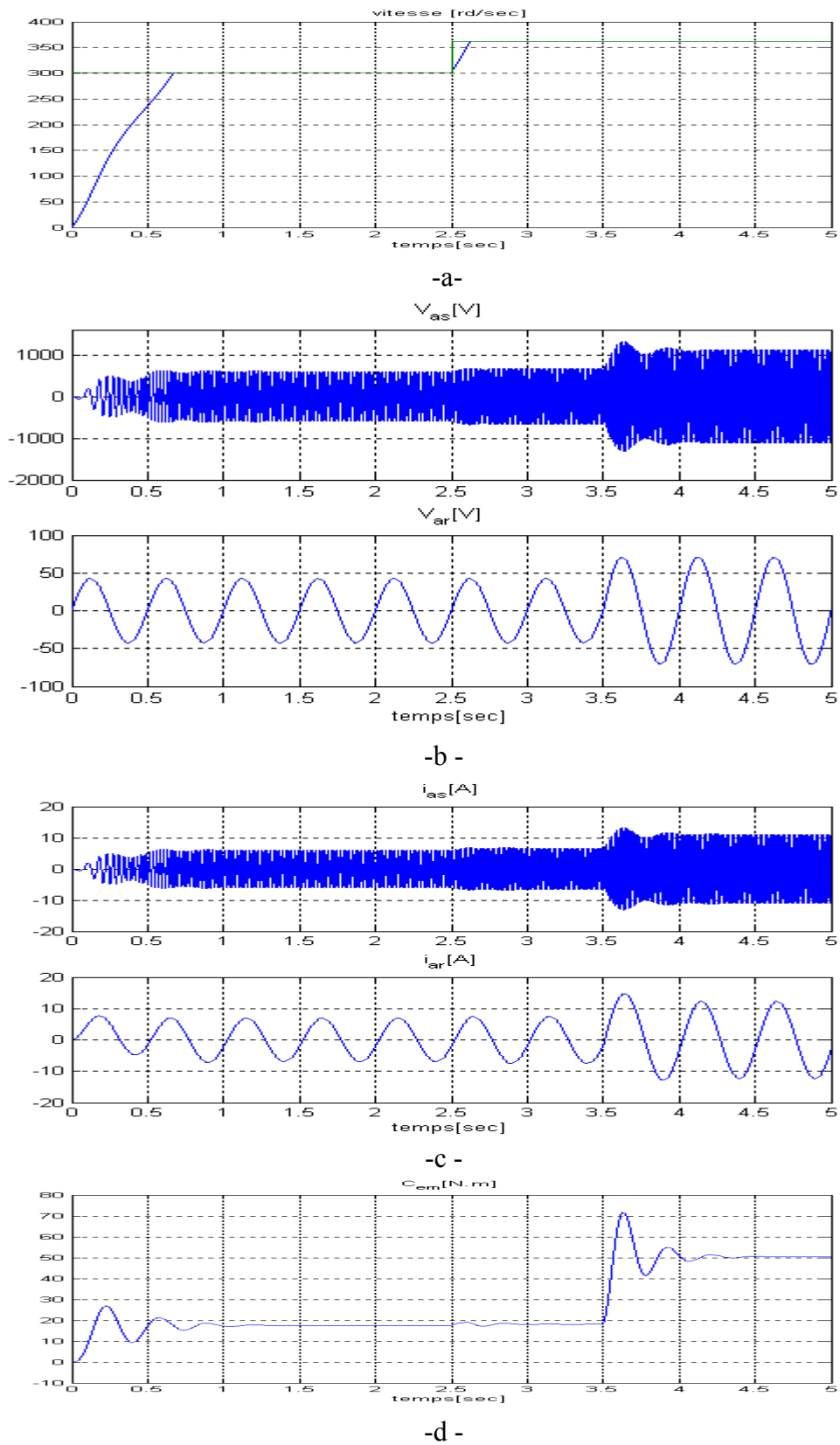


Fig.3.6. Simulation pour la 1<sup>ère</sup> Cas.

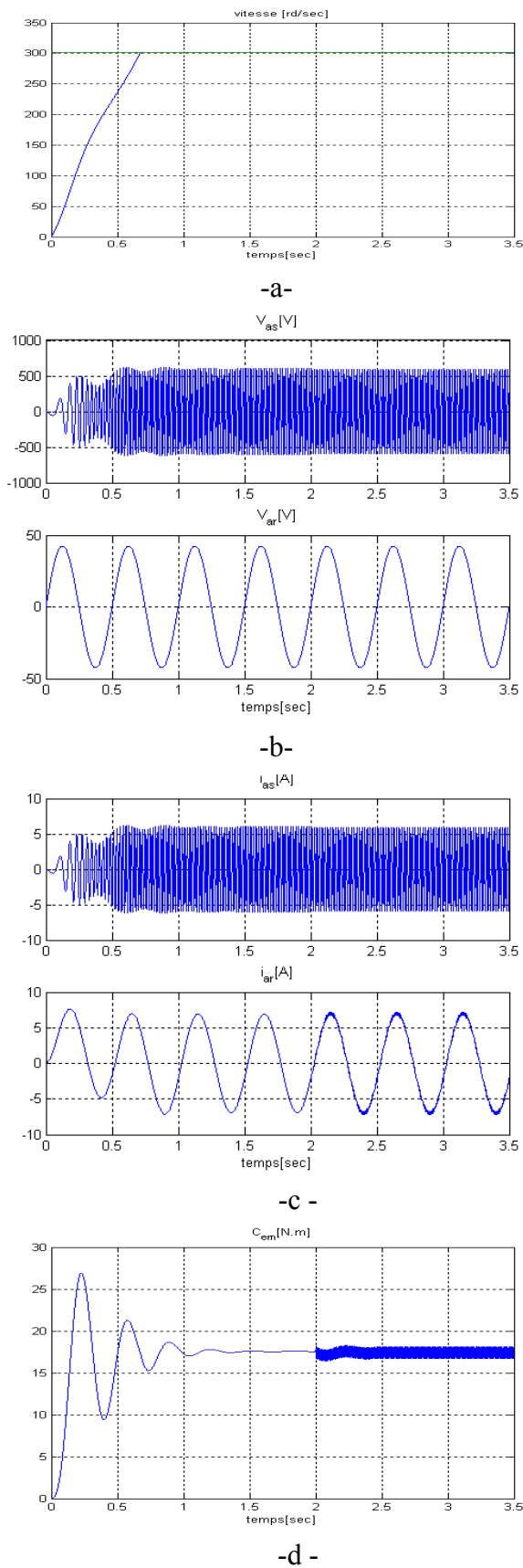


Fig.3.7. Simulation pour le 2<sup>ème</sup>

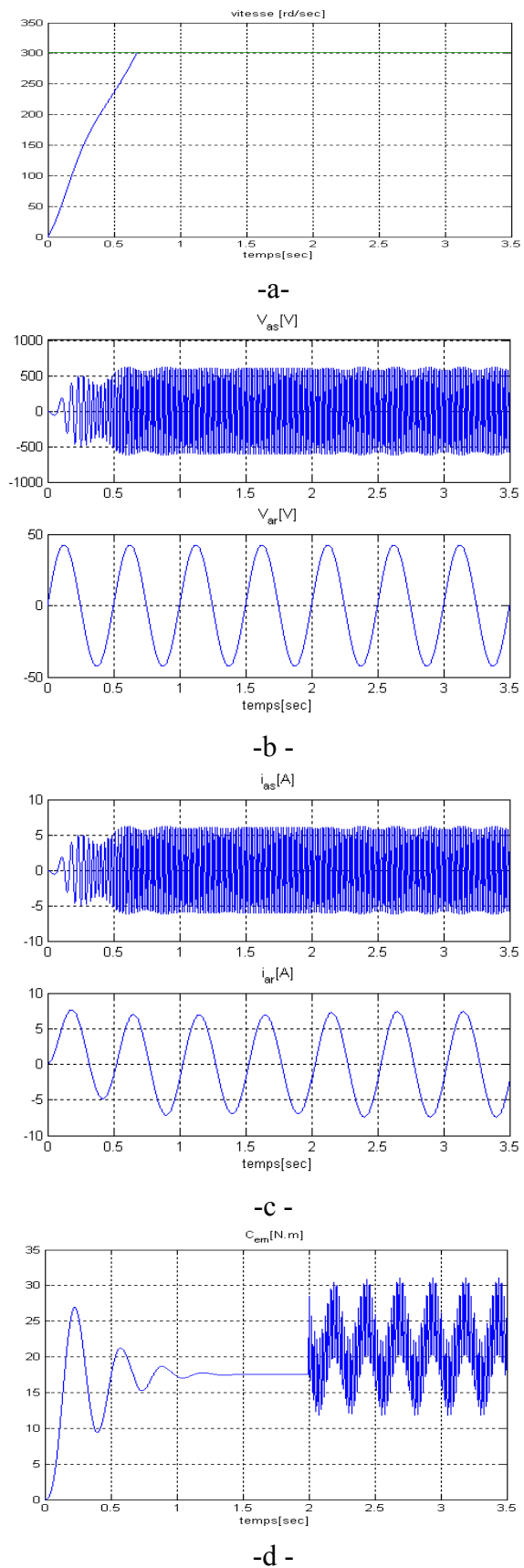


Fig.3.8. Simulation pour le 3<sup>ème</sup> Cas.





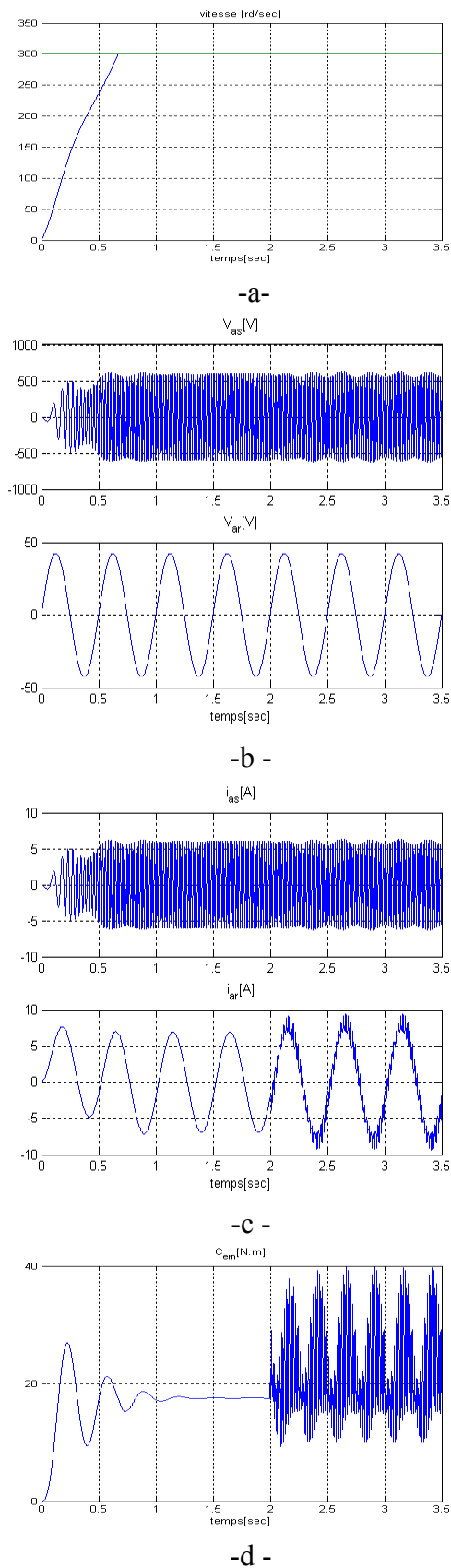


Fig.3.9. Simulation pour le 4<sup>ème</sup> Cas.

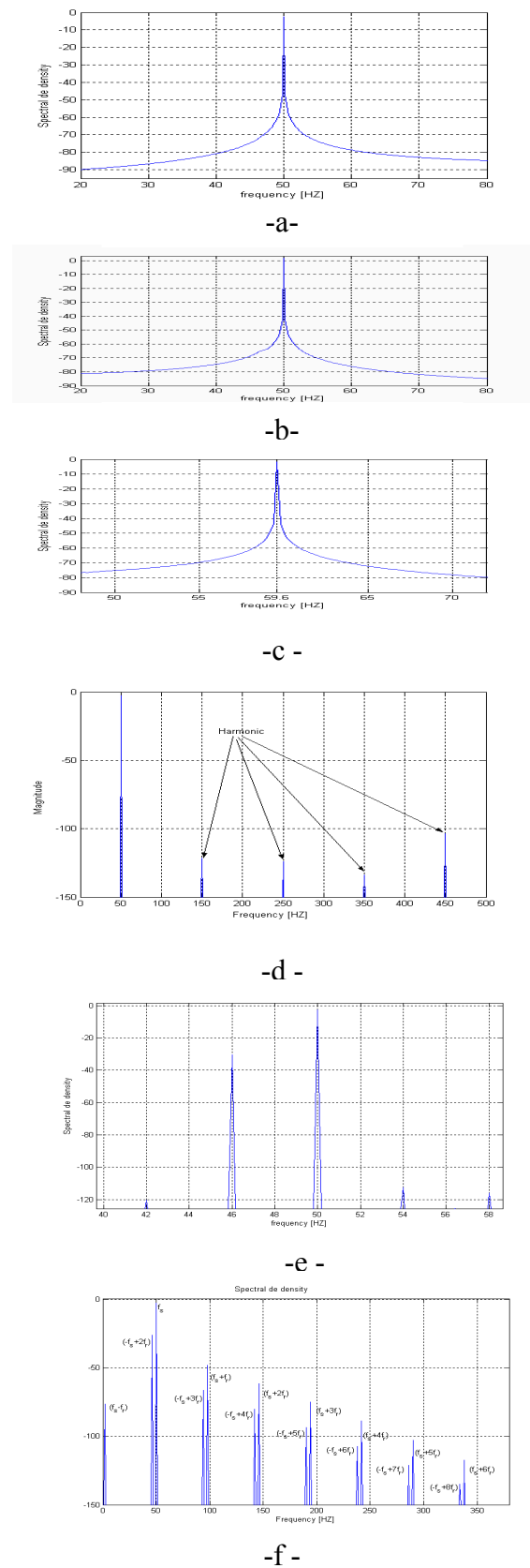


Fig.3.10. Analyse fréquentielle de courant  $i_{as}$ .



### **III.6. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à l'élaboration de modèles dédiés à la simulation et à la détection de défauts sur la machine asynchrone à double alimentation.

Trois types de défauts ont retenu notre attention : l'excentricité statique, l'excentricité dynamique et l'excentricité mixte au rotor. Une analyse fréquentielle des courants de la MADA a permis de constater des signatures de défauts d'excentricité au rotor.



## **Chapitre IV**

### **Méthodes d'analyse de défauts**

#### **Introduction**

En générale, les signaux issus de l'installation peuvent contenir des l'informations sur l'état du procédé à surveiller [51]. Et l'application des techniques de traitement du signal, telle que la Transformée de Fourier pour les signaux stationnaire et la Transformée de Fourier sur une fenêtre glissante ou la décomposition en ondelettes pour les signaux non stationnaires, pour l'analyse fréquentielle de ces signaux, peut faire ressortir les comportements anormaux du signal analysé et même permettent ainsi de détecter la présence d'une anomalie dans le signal [52].

Dans ce chapitre, on donne une synthèse sur trois techniques de traitement du signal pour diagnostiquer un défaut de fonctionnement d'une génératrice asynchrone dans une chaîne éolienne. Une étude comparative de ces méthodes sur le courant statorique de la génératrice sera réalisée dans l'environnement Matlab. Il s'agit à cette effet d'extraire et d'exploiter les informations pertinentes pour détecter les défaillances de la génératrice

#### **IV.1. Technique de traitement du signal**

##### ***IV.1.1. Théorie de la Transformé Rapide de Fourier***

La découverte de la Transformation Rapide de Fourier [53] [54], en 1965 par Cooley et Tukey [4.8] a été d'une importance majeure pour le traitement du signal car elle a permis d'envisager l'analyse spectrale numérique de signaux de longue durée en des temps raisonnablement courts. L'algorithme de Cooley et Tukey a très vite été connu sous le nom de transformation rapide de Fourier [55] [28] et il est généralement désigné par son appellation anglo-saxonne : FFT (Fast Fourier Transform).

L'analyse FFT est utilisée pour la description du signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. Selon le théorème de Fourier : Toute fonction continue est décomposable en série de Fourier. Si de plus cette fonction est périodique de période  $T$ , le nombre de termes de la décomposition est fini.



On peut alors écrire une fonction périodique de période  $T$ , de pulsation  $\omega = 2\pi/T$ , de fréquence  $f = 1/T$ , par une somme de fonctions sinusoïdales (ou cosinusoidales) appelée "Série de Fourier" :

$$x(t) = x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cdot \sin(2\pi f_n t + \alpha_n) \quad (4.1)$$

où

- $x_0$  : valeur moyenne, ou composante continue, la composante de fréquence nulle ( $n = 0$ ) ;
- $x_1 = X_1 \sin(2\pi f t + \alpha_1)$  : fondamental, l'harmonique de rang 1 ;
- $x_n = X_n \sin(2\pi n f t + \alpha_n)$  : harmonique de rang  $n$ , la composante de fréquence  $n f$  et  $n > 1$ .

L'amplitude et la phase des harmoniques sont fonctions de  $n$ , donc de la fréquence  $f$ . sont calculée à l'aide des relations suivantes :

$$X_n \cdot \sin(2\pi n f t + \alpha_n) = A_n \cos(2\pi n f t) + B_n \sin(2\pi n f t) \quad (4.2)$$

Les coefficients de Fourier  $A_n$  et  $B_n$  se calculent comme suit :

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{(T)} x(t) \cos(2\pi n f t) dt \quad (4.3)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{(T)} x(t) \sin(2\pi n f t) dt \quad (4.4)$$

$$x_0 = \frac{1}{T} \int_{(T)} x(t) dt = \frac{A_0}{2} \quad (4.5)$$

où

$$\alpha_n = \arctg \left( \frac{-B_n}{A_n} \right) \quad (4.6)$$

Dans la pratique cela veut dire que l'on peut décomposer la fonction en une somme de sinus (cosinus) de périodes multiples de la période de base de la fonction. Les coefficients représentent le niveau "énergétique de chacune des fréquences élémentaires".

L'application principale de l'analyse FFT est donc la mise en évidence des périodicités du signal, le calcul de "l'énergie" contenue dans le signal pour chacune des fréquences et d'observer les signaux qui ne sont pas périodiques. Elle est la plus utilisée pour représenter un phénomène temporel dans le domaine fréquentiel.

La plupart des signaux physiques que l'on doit traiter et analyser sont analogiques par nature (courant statorique, dans notre cas). En fait, seule la représentation numérique du signal est utilisée pour réaliser les calculs voulus [56]. C'est-à-dire qu'ils sont fonction d'une variable continue, le temps, et qu'eux mêmes varient de manière continue. Ces signaux



peuvent être traités analogiquement à l'aide de filtres par exemple. Les signaux d'entrée et de sortie sont alors analogiques (figure 4.1).

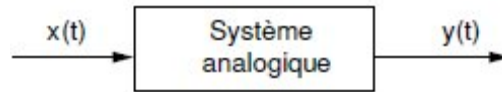


Fig. 4.1 – Traitement analogique d'un signal  $x(t)$ .

Souvent, pour des raisons de simplicité, de précision, de stockage de l'information, de flexibilité, etc. Un traitement numérique équivalent est possible et préférable. On utilise alors des convertisseurs analogiques-numériques (CAN) et numériques-analogiques (CNA) pour relier au processeur numérique les signaux analogiques d'entrée et de sortie. Le schéma correspondant est donné à la figure 4.2.

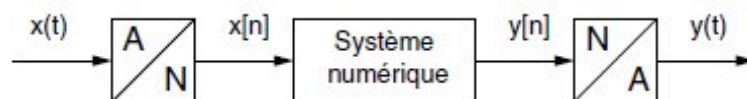


Fig. 4.2. Traitement numérique d'un signal analogique  $x(t)$ .

Conceptuellement, on peut considérer la conversion A–N comme un processus faisant intervenir trois actions successives : l'échantillonnage à période fixe  $T_e$ , la quantification du signal et son codage. Pratiquement, ces opérations sont effectuées dans un même élément, le convertisseur A–N, qui reçoit le signal analogique et le convertit en un signal discret quantifié. De même pour la conversion N–A, les opérations implicitement réalisées sont [56] :

- ◆ La numérisation du signal, comme l'illustre la figure 4.3. Suivant :

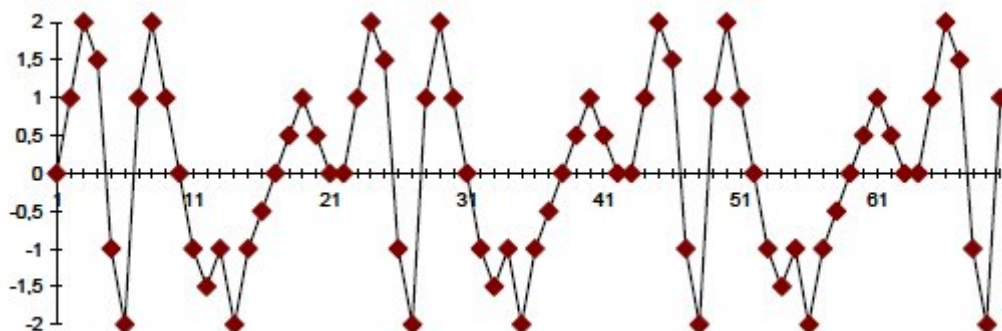


Fig.4.3. Numérisation d'un signal

Le signal est donc vu comme une suite de points prenant des valeurs d'amplitude différentes.

Par conséquent, la numérisation déforme la nature du signal et peut influencer sa signification.

♦ Une portion du signal numérisé (Fenêtrage temporel) est ensuite considérée pour circuit de calcul de la FFT [57]: Le traitement commence par le remplissage d'une mémoire de taille donnée (généralement une puissance de 2. Par exemple, un bloc de  $N = 1024 = 2^{10}$  échantillons temporels) qui sera la base temporelle d'analyse. Ces  $N$  échantillons temporels sont ensuite passés dans un algorithme de calcul de la transformée de Fourier rapide.

Alors, un problème physique se pose. En effet, le signal que l'on cherche à mesurer est un signal physique, réel, non prédictible. Il est à priori non périodique, et même s'il l'était, sa période ne serait pas celle définie par la fréquence d'échantillonnage que nous avons choisi (en fait de période  $N/F_e =$  longueur du bloc temporel; avec  $N =$  nombre de points dans le bloc de calcul et  $F_e =$  fréquence d'échantillonnage).

Le fait de limiter la durée d'observation à un bloc de longueur donnée or que les formulations de Fourier recommande, de travailler sur un temps infiniment long, sauf si la fonction est périodique, aucune mémoire n'est suffisamment importante pour accueillir la totalité du signal [56], entraîne comme conséquence de considérer notre signal comme périodique, de période égale à la durée d'observation (longueur du bloc temporel). Cette périodisation artificielle crée des discontinuités dans le signal temporel. De telles discontinuités dans le domaine physique correspondent à des énergies infinies. Par conséquence, puisque le résultat du calcul étant l'énergie contenue dans chacune des bandes, le résultat sera erroné.

Heureusement, puisque le signal considéré n'est pas continu mais numérisé, la discontinuité ne se traduit pas par un saut à énergie infinie mais par un saut de pente plus ou moins raide, donc une énergie plus ou moins importante qui vient s'ajouter au signal. Donc, l'erreur commise est alors proportionnelle à la "hauteur" de la discontinuité.

En fait l'analyseur a regardé le signal avec une fenêtre d'observation rectangulaire, c'est-à-dire, c'est comme on a ouvert les yeux de l'analyseur à un moment donné dans la vie du signal, que ses yeux sont restés ouverts pendant la durée d'observation et que brutalement, ils se sont refermés à la fin de l'observation. Ainsi, l'analyseur n'a respecté aucune périodicité.

Pour éviter les dégâts d'une telle fenêtre, d'autres fenêtres temporelles, qui servent à rendre le signal périodique sur la durée d'analyse, sont alors utilisées. Pour ce faire on va multiplier le signal temporel dans la mémoire par une fonction temporelle périodique, de période égale à la durée d'examen du signal, qui commence par 0 et fini par 0. Les fenêtres

utilisées en analyse spectrale sont nombreuses. On ne présente ici que celles les plus fréquemment appliquées à l'enregistrement d'un signal.

Elles sont définies comme suit :

- Rectangulaire:

$$W(n) = 1 \tag{4.7}$$

Les présentations temporelles et fréquentielle d'une telle fenêtre sont respectivement illustrées par les figures 4.4a et 4.4c

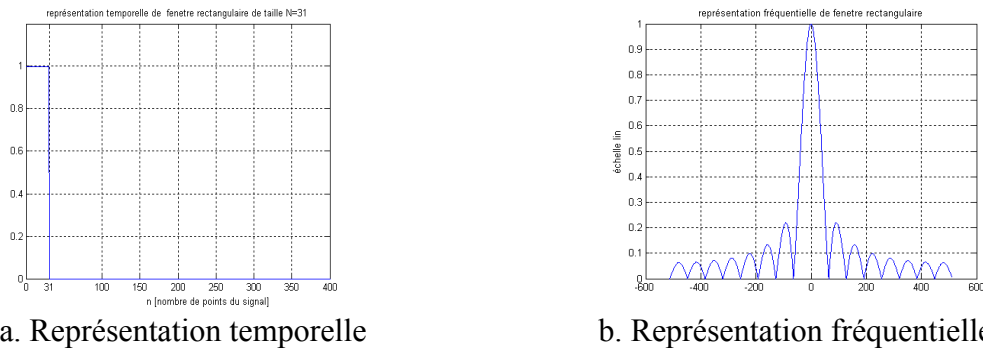


Fig.4.4 – Fenêtres d'observation rectangulaire.

Cette fenêtre ne modifie pas l'enregistrement ; c'est celle que l'on utilisera dans le cas de signaux transitoires ou non permanents et, dans le cas de signaux périodiques, lorsque l'on est sûr que le nombre de périodes enregistrées est un entier.

- Hanning:

La fenêtre en cosinus, dite de Hanning, est mathématiquement la plus simple et elle offre de bons résultats dans le cas de composantes spectrales pas trop proches. Elle est exprimée par la relation suivante :

$$W(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \tag{4.8}$$

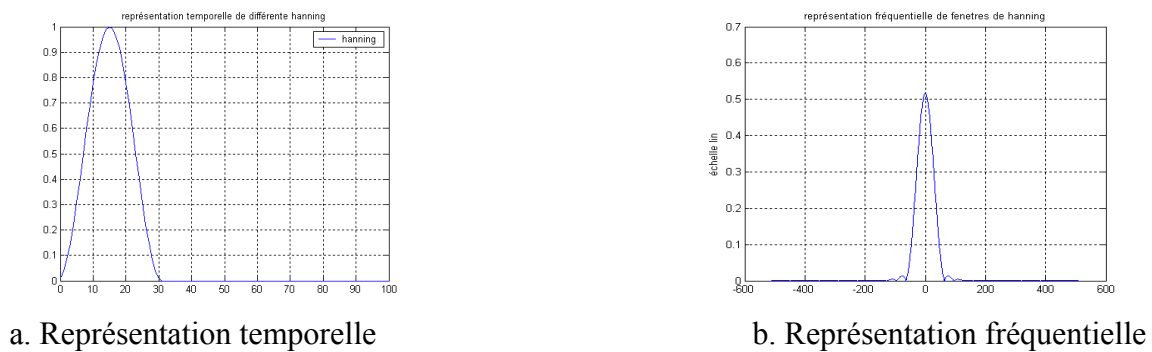


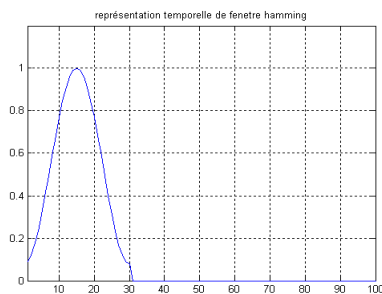
Fig.4.5 – Fenêtres d'observation de Hanning.



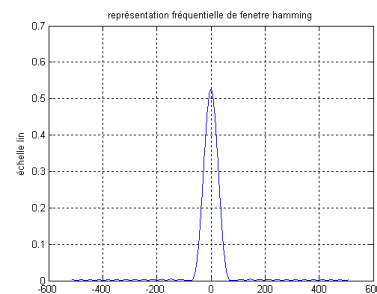
- Hamming:

La fenêtre en cosinus relevé, dite de Hamming, n'élimine pas complètement l'étalement spectral. Elle offre en contre partie une meilleure définition spectrale mais ne permet pas de voir des composantes spectrales de faibles amplitudes. Elle est exprimée par la relation (4.9). Et, ses représentations fréquentielle sont illustrées respectivement par les figures 4.6.a et 4.6.b.

$$W(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \tag{4.9}$$



a. représentation temporelle



b. représentation fréquentielle

Fig.4.6– Fenêtres d’observation de Hamming.

- Blackman

La fenêtre de Blackman, constituée de deux cosinus, atténue très fortement les effets de bord et permet ainsi de bien distinguer des raies spectrales proches et de faibles amplitudes.

$$W(n) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) \tag{4.10}$$

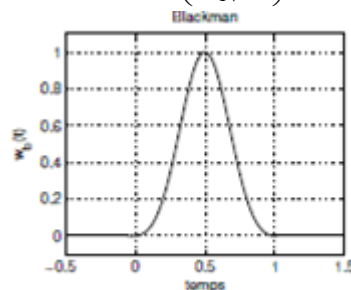


Fig.4.7 – Fenêtres d’observation de Blackman

tel que  $(n = 0, 1, 2, \dots N-1)$





### IV.1.1.1 Simulation :

- ❖ L'équation (4.11) et la Figure 4.8 correspondent au signal utilisé pour le premier type de signal de test.

$$x(t) = 20 * \sin(2 * \pi * f_1 * t) + 60 * \sin(2 * \pi * f_2 * t) \quad (4.11)$$

Avec  $f_1=30\text{Hz}$  et  $f_2=60\text{Hz}$

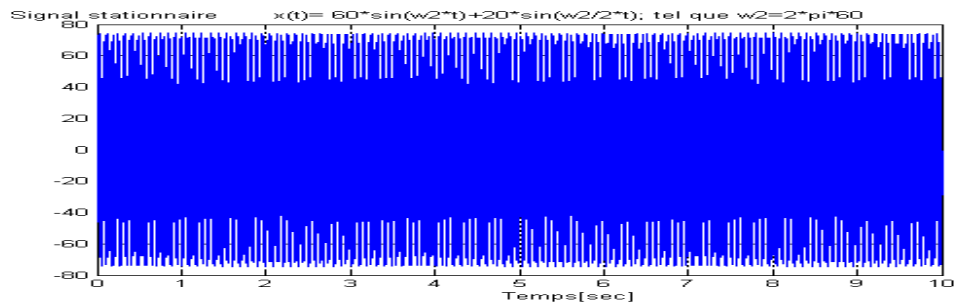


Fig. 4.8 - Signal de test du domaine temporel

Nous avons analysé ce signal en utilisant la transformation rapide de Fourier:

Le résultat de l'analyse est présenté par la figure 4.9. On remarque l'apparition de deux raies correspondantes aux deux fréquences  $f_1$  et  $f_2$  du signal test.

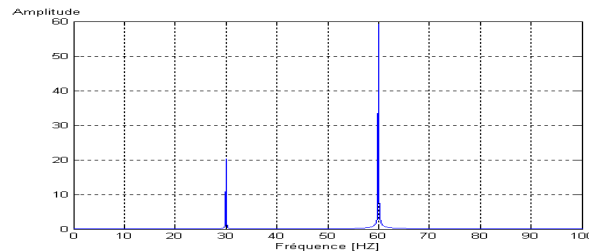


Fig. 4.9 - Transformée de Fourier du signal

Avec l'application de la transformée de Fourier on peut connaître quelles fréquences constituent le signal. Donc la Transformée de Fourier est efficace pour ce type de signal stationnaire.

- ❖ L'équation (4.12) et la Figure 4.10, présentent le signal utilisé pour le deuxième type de signal de test "impulsion de Dirac"

$$x(t) = \delta = \begin{cases} 1 & \text{Si } t=0.5\text{sec} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (4.12)$$



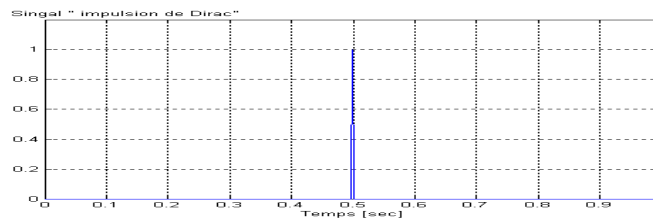


Fig. 4.10- Signal ''impulsion de Dirac''

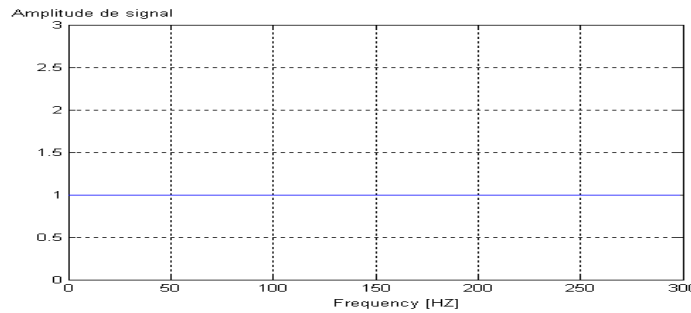


Fig. 4.11 - Transformée de Fourier du signal ''impulsion de Dirac''

Avec l'application de la transformée de Fourier sur le signal on peut pas de connaître le temps de l'application de l'impulsion de Dirac.

- ❖ L'équation (4.48) et présentent le la Figure 4.15 signal utilisé pour le troisième type de signal de test.

$$x(t) = x_1(t) + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \tag{4.13}$$

Tel que

$$x_1(t) = \begin{cases} 60 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t) + 20 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 30 \cdot t); & \text{Si } t < 5 \text{ sec} \\ 20 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot t); & \text{Si } t \geq 5 \text{ sec et } t < 5.5 \text{ sec} \\ 20 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 80 \cdot t); & \text{Si } t \geq 5.5 \text{ sec} \end{cases}$$

et

$$\delta_1 = \begin{cases} 80 & \text{Si } t = 6 \text{ sec} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 80 & \text{Si } t = 7 \text{ sec} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

$$\delta_3 = \begin{cases} 80 & \text{Si } t = 8 \text{ sec} \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$



La figure 4.12, Ci-dessous illustre le comportement dans le temps d'un tel signal.

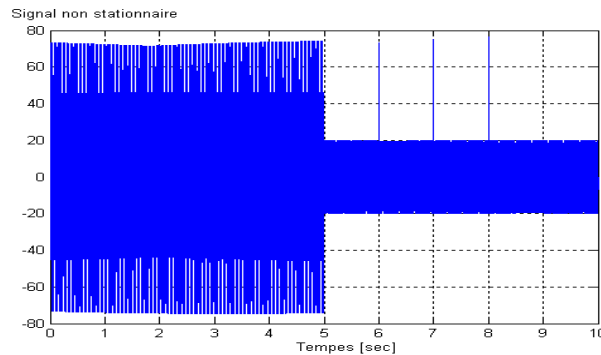


Fig. 4.12- Signal non stationnaire de test.

Nous avons analysé ce signal en utilisant la transformation rapide de Fourier (figure 4.13):

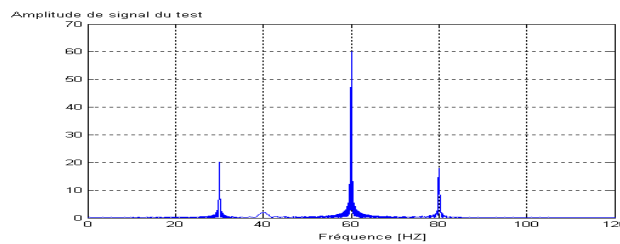


Fig. 4.13- Transformée de Fourier du signal

#### IV 1.1.2. Remarque

Avec l'application de la transformée de Fourier sur le signal non-stationnaire on ne peut pas connaître quelles fréquences constituent le signal. Donc la Transformée de Fourier n'est pas adaptée à l'analyse de signaux non-stationnaire et on ne peut pas situer dans le temps les fréquences mesurées par ce que la correspondance temps-fréquence inexistante.

L'analyse FFT est une opération par bloc temporel qui nécessite des compromis permanents (choix de la résolution, de la fenêtre d'observation,.....). Les lectures de niveau sont généralement dépendantes de la fenêtre d'observation. L'aspect temps réel de l'analyse va dépendre de la vitesse des processeurs par rapport à la fréquence d'échantillonnage et le nombre de voies à traiter. Les paramètres suivants sont à retenir:

- Fréquence d'échantillonnage =  $F_e$  (Hz) : cadence à laquelle le signal est regardé par l'analyseur.  $F_e = 1/D_t$  avec  $D_t$  = période ou intervalle d'échantillonnage en seconde (s).



- Nombre de points temporels du calcul FFT = N (1024 points par exemple) : nombre d'échantillons temporels utilisés dans le bloc mémoire pour l'algorithme FFT.
- Résolution temporelle = T (s) : longueur du signal nécessaire pour obtenir un spectre instantané ou longueur du bloc de calcul.  $T = N \cdot D_t$ .
- Résolution fréquentielle = B (Bandwidth) ou  $D_f$  (Hz) : résolution ou finesse d'analyse du spectre FFT.  $D_f = 1/T = F_e/N$ .

### IV.1.2 Transformée de Fourier sur fenêtre glissante

Si le signal à étudier est non stationnaire, l'idée de la Transformée de Fourier sur fenêtre glissante en anglais Short Time Fourier Transform (STFT) est d'analyser celui-ci sur des fractions supposées stationnaires. La transformée de Fourier est appliquée à chaque fraction du signal, permettant ainsi une détermination pas à pas des propriétés fréquentielles du signal.

Si on veut représenter les propriétés fréquentielles d'un signal localement en temps, il convient de les analyser par des signaux localisés en temps et en fréquence [ ]. Cette propriété de localisation temps-fréquence est limitée par les deux résultats suivants:

#### A. Théorème d'incertitude de Heisenberg

Si  $f$  est dans  $L^2$ , alors on peut définir son écart-type  $\delta_t$  en temps et l'écart-type  $\delta_w$  (en fréquence) de sa transformée de Fourier Alors

$$\delta_t^2 \delta_w^2 \geq \frac{1}{4} \quad (4.14)$$

On est donc contraint à un compromis entre résolution temporelle et fréquentielle. Pour le cas limite de la sinusoïde,  $\delta_w$  est nul et  $\delta_t$  est infini.

L'inégalité ci-dessus est une égalité si et seulement si  $f$  est un chirp de Gabor .

#### B. Compacité des supports

Si  $f$  est non nul et à support compact, alors sa transformée de Fourier ne peut s'annuler sur tout un intervalle. De même, si sa TF est à support compact,  $f$  ne peut s'annuler sur tout un intervalle.

Même en tenant compte du principe d'incertitude, il est donc impossible d'avoir une fonction  $L^2$  qui soit à support compact en temps et en fréquence. En particulier, il n'existe pas d'analyse fréquentielle instantanée pour un signal d'énergie finie.



La localisation en temps-fréquence n'est donc atteignable qu'en écart-type. Pour un atome de base, celle-ci, se représente sous la forme d'une boîte de Heisenberg, située dans le plan temps fréquence, qui est un rectangle de dimensions  $\sigma_t$  et  $\sigma_\omega$ , centré sur le point de coordonnées (centre temporel, centre fréquentiel).

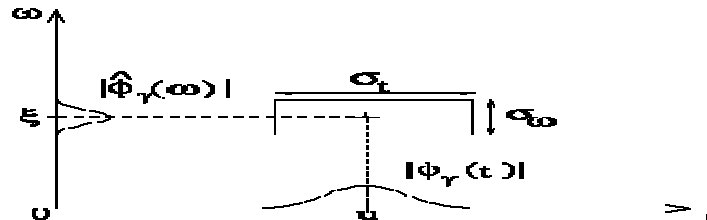


Fig. 4.14 Boîte de Heisenberg

Le signal est analysé sur une fenêtre  $g$  sur laquelle le signal est supposé stationnaire. La longueur de la fenêtre est donc choisie afin de vérifier l'hypothèse de stationnarité. Ce choix influence directement la résolution de la décomposition : si la fenêtre  $g$  est petite, la résolution temporelle est grande mais celle fréquentielle est faible, et inversement [58]. Donc, si une grande résolution fréquentielle est nécessaire, alors il faut utiliser une fenêtre d'analyse grande, et il sera alors difficile de respecter l'hypothèse de stationnarité. La forme et la longueur de la fenêtre, ainsi que le pas de déplacement, sont des paramètres qui doivent être fixés au début de l'analyse, ce qui suppose une bonne connaissance, à priori, du signal à analyser. La formule utilisé pour calculer la STFT est exprimée par la relation suivante [59] [60] :

$$S_\tau(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) * g(t - \tau) * e^{-j2\pi f(t-\tau)} dt \quad (4.15)$$

L'atome utilisé est une sinusoïde multipliée par une fenêtre  $g$  symétrique d'énergie finie. La famille de vecteurs d'analyse est obtenue par translation et modulation de la fenêtre:

$$g_{\tau,\varepsilon}(t) = e^{j\varepsilon t} g(t - \tau) = g(t - \tau) * e^{-j2\pi f(t-\tau)} \quad (4.16)$$

Où  $S(t)$  est le signal,  $\tau$  représente le paramètre de localisation de la fenêtre  $g(t)$ ,  $S_\tau(f)$  correspond au spectre du signal  $S(t)$  autour de  $\tau$ .



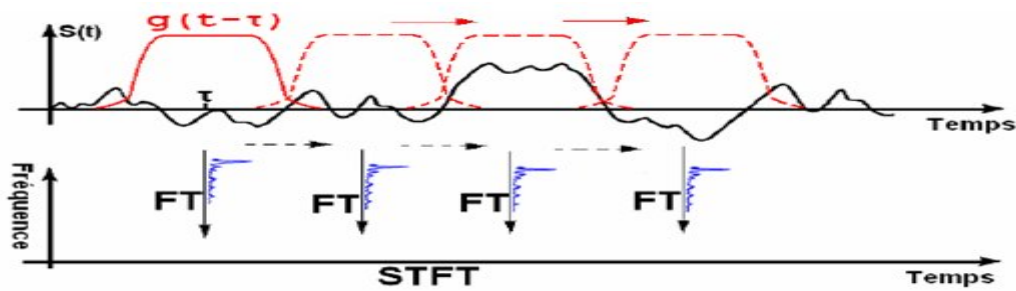


Fig.4.15–Transformée de Fourier sur une fenêtre glissante

La Figure 4-5, décrit la procédure de calcul de la STFT : nous calculons la transformée de Fourier du produit  $S(t)*g(t-\tau)$  de la même manière qu'on prend la FT d'un signal quelconque (stationnaire) puisque la durée de  $g(t)$  est petite. Donc en décalant  $g$  et répétant la même procédure, nous obtenons une idée du contenu fréquentiel du signal  $S(t)$  au long de temps. L'inconvénient majeur de cette technique est, évidemment, que la taille de la fenêtre d'analyse fixe ne correspond pas nécessairement à la nature variable des signaux [61].

La fonction précédente est centrée fréquentiellement en  $x$  et symétrique par rapport à  $\tau$ .

Les écarts-type en temps est aussi en fréquence sont constants. La famille est donc obtenue par translation en temps et en fréquence d'une fenêtre unique.

La transformée de Fourier fenêtrée a une résolution temps-fréquence fixe. Cette résolution peut être modifiée par un changement d'échelle  $s$  sur la fenêtre  $g$ . C'est une représentation complète, stable et redondante du signal. Elle est donc inversible. La redondance se traduit par l'existence d'un noyau reproduisant [62].

Le carré du module de la transformée de Fourier fenêtrée est le *spectrogramme* du signal:

$$P_{sf}(\tau, \varepsilon) = |Sf(\tau, \varepsilon)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g(t - \tau) e^{-j\varepsilon t} dt \right|^2 \quad (4.17)$$

La transformée de Fourier fenêtrée discrète d'un signal  $f$  de période

$$Sf[m, l] = \langle f, g_{m,l} \rangle = \sum_{n=0}^{N-1} f[n] g[n - m] e^{-\frac{j2\pi l n}{N}} \quad (4.20)$$

A  $m$  donné, on retrouve la formule d'une transformée de Fourier discrète. Le calcul est donc effectué au moyen de  $N$  transformées de Fourier rapides, en  $O(N^2 \log_2(N))$  opérations.

- ✚ Le principal désavantage de la STFT est le mauvais compromis réalisé entre résolutions temporelles et fréquentielle.



- En effet, si on réduit la largeur de la fonction d'analyse afin d'augmenter la résolution temporelle, on va créer artificiellement un signal de durée limitée, donc à spectre large.
- Ce mauvais compromis est spécifique de la STFT, et d'autres méthodes permettent de faire beaucoup mieux.

Afin de surmonter ces limites, nous avons évalué d'autres techniques d'analyse temps fréquence, comme la transformée en ondelettes.

#### IV.1.2.1 Choix de la fenêtre de Fourier fenêtrée

Les propriétés de la transformée de Fourier fenêtrée sont déterminées par sa fenêtre  $g$ , ou plutôt par la transformée de Fourier de celle-ci, dont on cherche à concentrer l'énergie autour de 0.

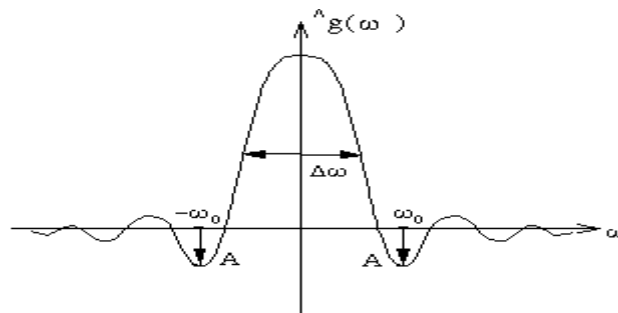


Fig.4.16– fenêtre  $g$

Trois paramètres sont importants:

- ♦ la largeur quadratique moyenne de base  $\Delta\omega$  définie par

$$\frac{\left| \hat{g} \left( \frac{\Delta\omega}{2} \right) \right|^2}{\left| \hat{g} (0) \right|^2} = \frac{1}{2} \quad (4.18)$$

Si  $\Delta\omega$  est petit, l'énergie de la fenêtre est bien concentrée autour de 0.

- ♦ l'amplitude maximale  $A$  du premier lobe latéral, en décibels:

$$A = 10 \log_{10} \frac{\left| \hat{g} \left( \frac{\Delta\omega}{2} \right) \right|^2}{\left| \hat{g} (0) \right|^2} \quad (4.19)$$



Ces lobes latéraux peuvent créer des "ombres" portées par la ou les fréquences principales.

- ♦ le taux de décroissance polynomial de la transformée de Fourier de  $g$  à l'infini:

$$\left| \hat{g}(\omega) \right| = O(\omega^{-p-1}) \text{ qui résume ce qui se passe au delà du premier lobe latéral.}$$

La tableau suivant donne la valeur de ces paramètres pour quelques fenêtres classiques, normalisées de manière à avoir  $g(0) = 1$ .

TABLE 4.1:DIFFERENTE TYPE DE FENETRES.

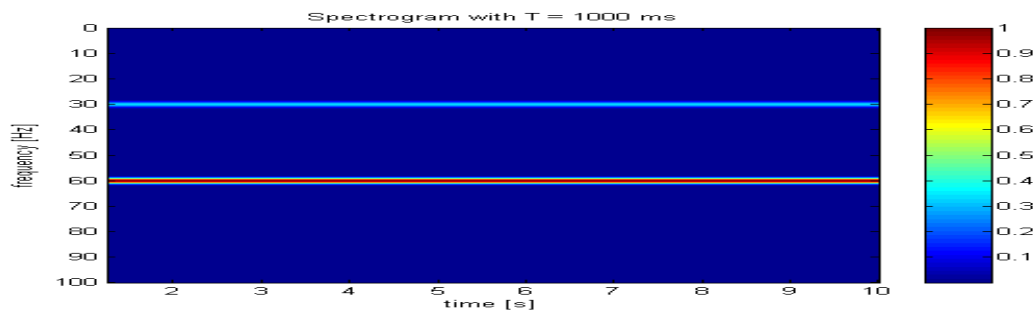
Nom	$g(t)$	$\Delta\omega$	A	p
Rectangle	1	0,89	-13 db	0
Hamming	$0,54 - 0,46 \cos(2\pi t)$	1,36	-43 db	0
Gaussienne	$\exp(-18t^2)$	1,55	-55 db	0
Hanning	$\cos^2(\pi t)$	1,44	-32 db	2
Blackman	$0,42 - 0,5 \cos(2\pi t) + 0,08 \cos(4\pi t)$	1,68	-58 db	2

#### IV.1. 2.2. Simulation du signal test en utilisant STFT

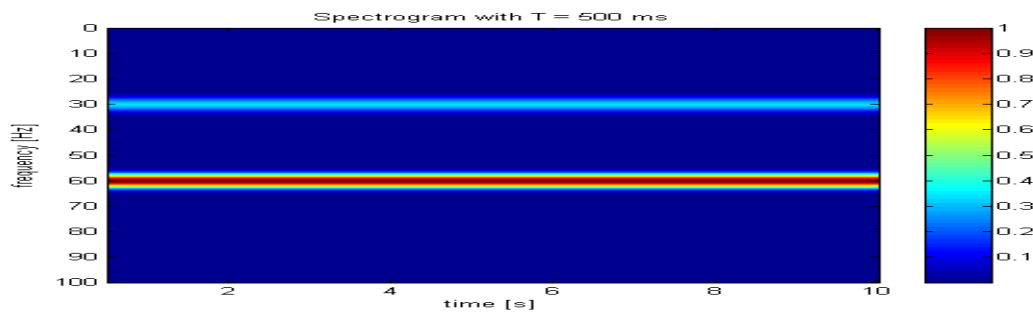
Considérons le même signal analysé précédent avec la transformé de Fourier (&IV.1.1.1), le signal est présenté par l'équation (4.11) et sa représentation temporelle par la figure 4.8. Dans cette partie nous avons analysé ce signal test en utilisant la STFT avec 3 fenêtres d'analyse de mêmes types (fenêtre de blackman) mais de tailles différentes soient 0.25s, 0.5s et 1seconde. les résultats de simulation obtenu sont présentés en figure 4.17 a, b et c respectivement.



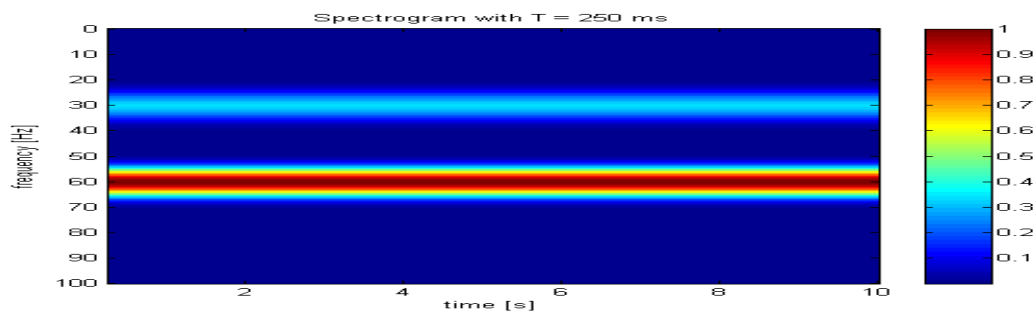




a. Fenêtre d'analyse de 1s



b. Fenêtre d'analyse de 0.5s



c. Fenêtre d'analyse de 0.25s

Fig.4.17- Représentation temps fréquence du signal du test 1 en utilisant STFT.

Sur les graphes précédentes, la couleur correspond à l'énergie du signal, l'axe des abscisses correspond au temps et l'axe des ordonnées à la fréquence. Nous notons que la résolution fréquentielle de la première analyse est de 2Hz environ et la résolution temporelle d'environ 1 s. La diminution de la fenêtre lors de la deuxième analyse nous donne une dégradation de la résolution fréquentielle qui passe à 4Hz, tandis que la résolution temporelle augmente jusqu'à 0.5s. La diminution de la fenêtre lors de la troisième analyse nous donne une dégradation de la résolution fréquentielle qui passe à 10Hz, tandis que la résolution temporelle augmente



jusqu'à 0.25s. En a constater que si la fenêtre est étroite la résolution en temps est bonne mais la résolution en fréquence est mauvaise et inversement.

Pour les signaux de type stationnaire il faut de choisir des fenêtres suffisamment étroites pour obtenir une bonne résolution en fréquence.

- ❖ Considérons maintenant le deuxième signal test : l'impulsion de Dirac à  $t=0.5s$ , exprimée précédemment par la relation 4.12.

Les résultats de simulation obtenue. Lors de l'analyse de ce type de signal à l'aide de la STFT, sont illustrés par les figures 4.18a et 4.18b.pour des fenêtres d'analyse de 1ms et 100ms, respectivement.

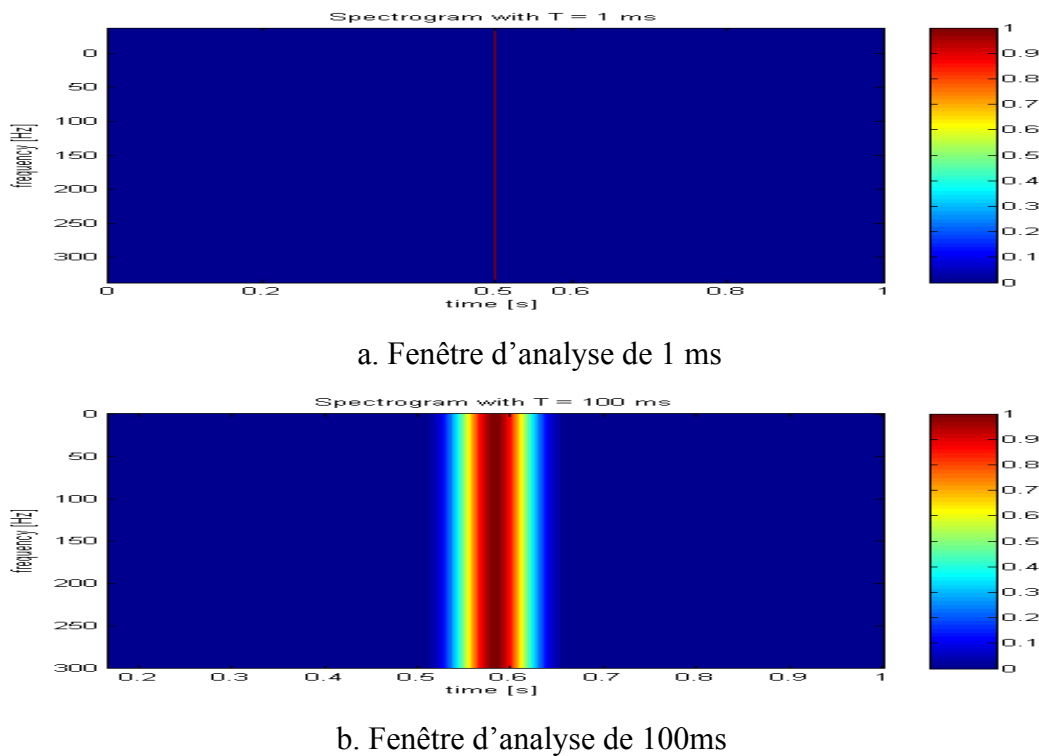
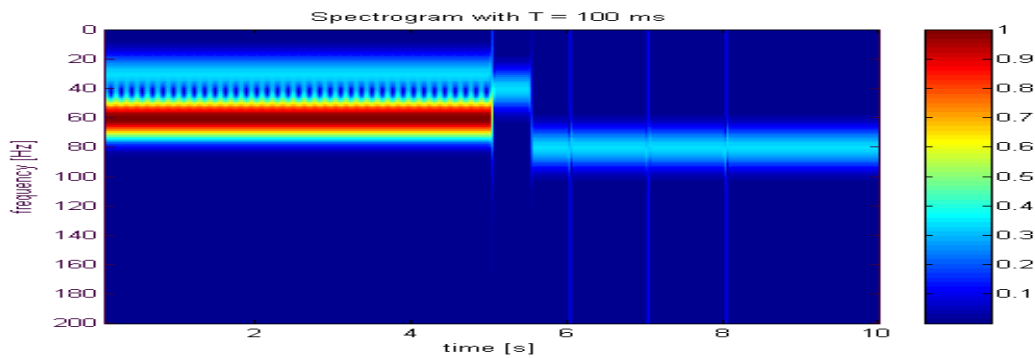


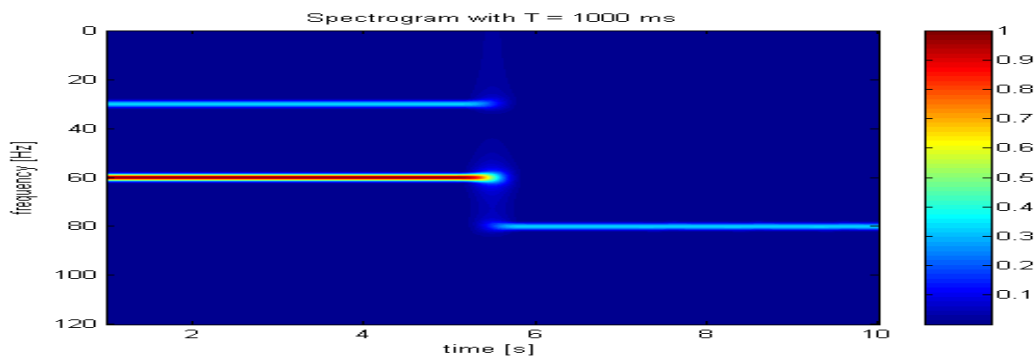
Fig. 4.18- Signal "impulsion de Dirac" et sa transformée (STFT).

La diminution de la fenêtre lors de la première analyse nous donne une augmentation de la résolution temporelle qui augmente jusqu'à 1ms. L'augmentation de la fenêtre lors de la deuxième analyse donne une dégradation de la résolution temporelle qui passe à 100ms, tandis que la résolution temporelle augmente jusqu'à 0.25s.

Concernant, l'analyse du 3<sup>ème</sup> signal test (signal non stationnaire), exprime par la relation (4.13).L'analyse est réalisé avec 2 fenêtres de mêmes types (fenêtre de blackman) mais de tailles différentes :



a. Fenêtre d'analyse de 100 ms



b. Fenêtre d'analyse de 1000ms

Fig. 4.19- Représentation temps fréquence du signal du test 3 en utilisant STFT.

La transformée de Fourier à fenêtre glissante présente pour ce cas les mêmes limitations que la transformée de Fourier car il est impossible de trouver en pratique une valeur de  $a_0$  qui permette une visualisation simultanée des toutes les phénomènes (les impulsions de Dirac et la somme des sinusoïdes): cela impliquerait que la fenêtre  $h$  soit bien localisée à la fois en temps et en fréquence, ce qui est impossible d'après le principe d'incertitude de Heisenberg.

### IV.1.3. La transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes fournit une représentation temps-fréquence ou temps- échelle du signal. Elle a été développée pour surmonter l'avènement de (STFT) [63], qui peut aussi être utilisé pour analyser des signaux non-stationnaires. Alors que STFT donne une résolution fixe à toutes les fréquences, la transformée en ondelettes multi-résolution utilise la technique des fréquences différentes qui sont analysées avec différentes résolutions.

L'analyse en ondelettes est similaire à l'analyse par STFT. Le signal à analyser est multiplié par une fonction en ondelettes comme il est multiplié par une fenêtre en fonction STFT, puis



la transformation est calculée pour chaque segment de produits. Cependant, contrairement à STFT, en transformation en ondelettes, la largeur de la fonction d'ondelettes change à chaque composante spectrale [64]. La transformée en ondelettes, à haute fréquence, donne une bonne résolution temporelle et une mauvaise résolution en fréquence, tout en basses fréquences, la transformée en ondelettes donne une bonne résolution en fréquence et une mauvaise résolution temporelle [65].

L'idée des ondelettes est donc de projeter la fonction signal sur un espace de fonctions à support temporel limité, de façon à pouvoir étudier ce qui se passe localement.

En fait, on va projeter le signal  $x$  sur une famille de fonctions à valeur moyenne nulle (les ondelettes), déduites d'une fonction élémentaire (l'ondelette mère) par des translations et des dilatations [4.66]:

$$S_{\tau}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(s) \psi_{t,a}^*(s) ds \quad (4.22)$$

$$\psi_{t,a}(s) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{s-t}{a}\right) \quad (4.23)$$

On obtient ainsi ce qu'on appelle la transformation continue en ondelettes (continuous wavelet transform, CWT).

La variable "a" est un facteur d'échelle, car si  $|a| > 1$  l'ondelette  $\psi$  est dilatée, et si  $|a| < 1$  elle est comprimée. La CWT est donc une représentation plutôt temps-échelle que temps-fréquence [4.23].

- Toutefois, si est bien localisée autour d'une fréquence  $f_0$ , une interprétation temps-fréquence est possible avec une identification formelle  $f = f_0 / a$ .
- La CWT utilise une fenêtre courte aux fréquences élevées et une fenêtre longue aux fréquences basses, ce qui permet de résoudre partiellement le problème du compromis temps-fréquence [65].

L'écart-type en temps est proportionnel à  $s$ . L'écart-type en fréquence est inversement proportionnel à  $s$ . L'exemple de boîtes de Heisenberg d'atomes d'ondelettes, représente par la figure 4.8, dédié les principes de cette théorie.



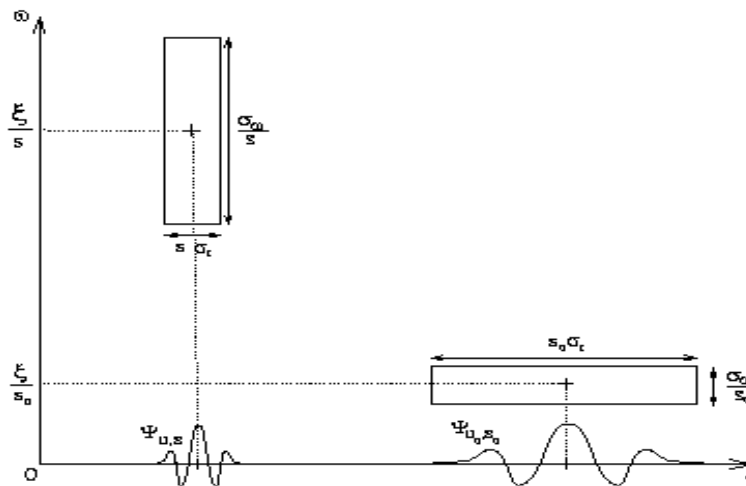


Fig.4.20– Boîtes de Heisenberg d'atomes d'ondelettes

• La bande passante B est proportionnelle à la fréquence  $f$ , et donc  $B / f = Q$  est une constante. On parle de bande passante car la CWT peut être vue comme une opération de filtrage de  $x$  par un ensemble (banc) de filtres. On note deux propriétés importantes:

- ♦ La CWT est invariante par translation en temps et en échelle [4.23].

$$y(t) = \sqrt{|a_0|} x[a_0(t - t_0)]$$

$$\Rightarrow T_y(t, a; \psi) = T_x(a_0^*(t - t_0), a / a_0; \psi) \tag{4.24}$$

- ♦ Le signal  $x$  peut être retrouvé à partir de sa transformée par la relation suivante:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T_x(s, a; \psi) \psi_{s,a}(t) ds \frac{da}{a^2} \tag{4.25}$$

La transformation discrète en ondelettes (DWT) est définie par:

Le choix le plus commun,  $a_0 = 2, t_0 = 1$ , est appelé échantillonnage dyadique.

- Par contre la DWT perd la propriété d'invariance par translation temporelle.



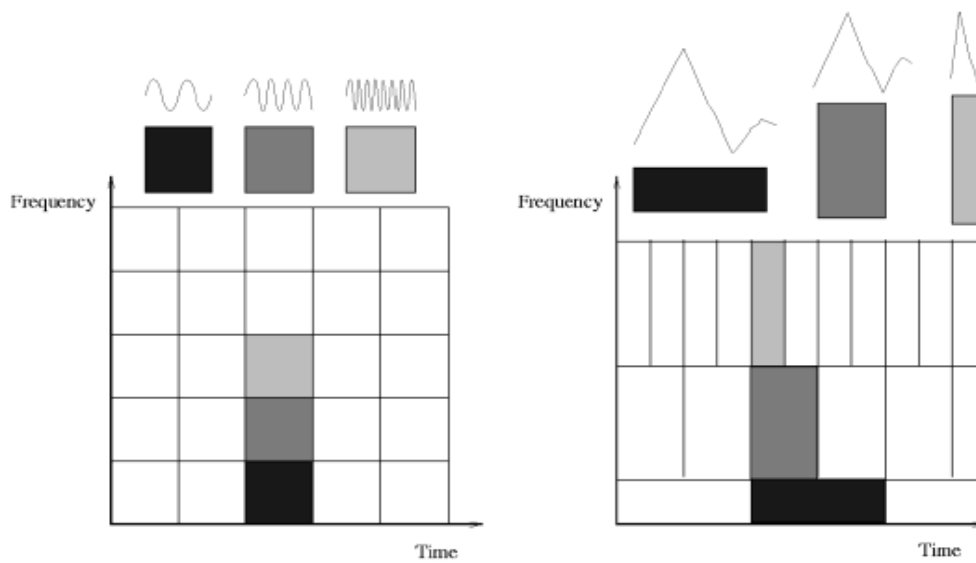


Fig.4.21– La transformée de Fourier sur une fenêtre glissante et DWT

La DWT est une projection sur un ensemble de fonctions non orthogonales. L'un des résultats majeurs de la théorie des ondelettes a été le développement de bases orthonormales d'ondelettes, avec les avantages qui en découlent.

Toutefois cette approche a été surtout appliquée dans le contexte de la compression (tout particulièrement les images) et dans celui du débruitage. Mais on peut bien sûr utiliser une base orthonormale d'ondelettes pour l'analyse de signaux.

Les paramètres d'échelle  $a$  et de translation  $b$  intervenant dans la définition des coefficients d'ondelettes sont définis comme étant continus. La décomposition multiéchelle (transformée en ondelettes discrètes), qui correspond à des valeurs discrètes de  $a$  et  $b$ .

Nous donnons ci dessous une version discrétisée de la transformée en ondelettes en posant :

$$a = a_0^m \quad \text{avec} \quad a_0 > 1 \tag{4.35}$$

$$b = nb_0 \cdot a_0^m \quad \text{avec} \quad b_0 > 0, \quad m \text{ et } n \text{ sont des entiers.}$$

Les fonctions analysantes  $\psi_{ab}$  seront notées dans ce cas  $\psi_{nm}(t) = \psi(a^{-m}_0 t - nb_0)$  et les coefficients d'ondelettes seront notés  $T_x^\psi(m, n)$  au lieu de  $T_x^\psi(a, b)$ . La valeur du coefficient

$|T_x^\psi(m, n)|^2$  représente alors l'énergie du signal dans l'intervalle de temps  $[kb_0 \cdot a_0^m ; (k+1) b_0 a_0^m]$

et la bande de fréquences  $\left[ \frac{1}{a_0^{m+1}} ; \frac{1}{a_0^m} \right]$ .



La définition de la décomposition d'un signal  $x(t)$  en coefficients discrets d'ondelettes ne change pas par rapport à la définition continue, mais est appliquée avec des valeurs particulières de  $a$  et  $b$ :

$$T_x^m(n; m) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{nm}(t) dt \quad m, n \in Z \quad (4.36)$$

La formule de reconstruction permettant de retrouver  $x(t)$  à partir de l'ensemble discret de ses coefficients d'ondelettes devient:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} T_x^m(n; m) \psi_{nm}(t) dt \quad m, n \in Z \quad (4.37)$$

Donc, les ondelettes sont toujours continues, mais les coefficients de la transformée sont dénombrables sur un intervalle de l'espace-temps.

### IV.1.3.1 Simulation

- ❖ Considérons le même signal test présenté par l'équation (4.11). L'analyse de ce signal en utilisant la transformée en ondelette continue, nous donne le résultat de simulation présenté par la figure 4.21.

Dans cette courbe les couleurs correspondent à l'amplitude des coefficients de l'ondelette.

L'axe des abscisses correspond toujours au temps et l'axe des ordonnées à l'échelle.

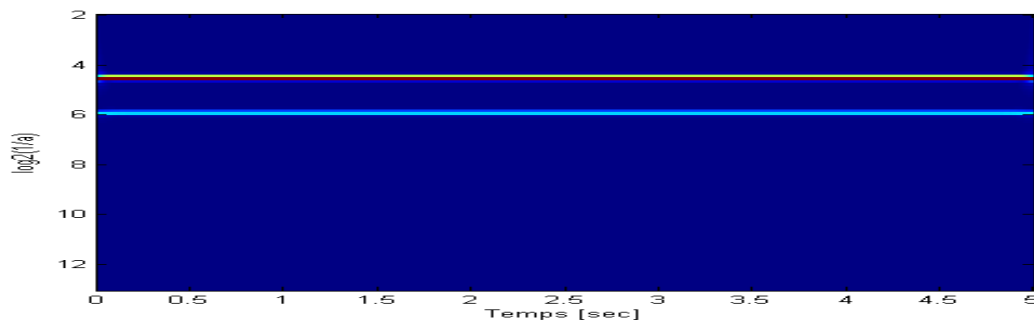


Fig.4.22: Représentation temps échelle du signal en utilisant la transformée en ondelette.

Cette courbe montre clairement que la résolution temporelle, varie avec la fréquence.

À titre de comparaison, nous notons que l'analyse par FFT donne une meilleure résolution en fréquence pour les signaux stationnaires par rapport à la STFT et l'ondelette.

- ❖ Concernant l'analyse du signal de Dirac de l'équation (4.12), en utilisant la transformée en ondelette, nous avons représenté à la figure 4.23, les résultats de simulation obtenus.



remarque, qu'avec la transformée en ondelette on peut observer la variation de la fenêtre d'observation en fonction de la fréquence.

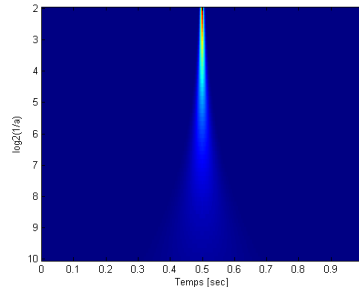


Fig. 4.23 - Transformée en ondelettes de Signal "Dirac".

- ❖ De même, pour l'analyse en ondelette du 3<sup>ème</sup> signal test, sa représentation est illustrée à la figure 4.24, ci-dessous :

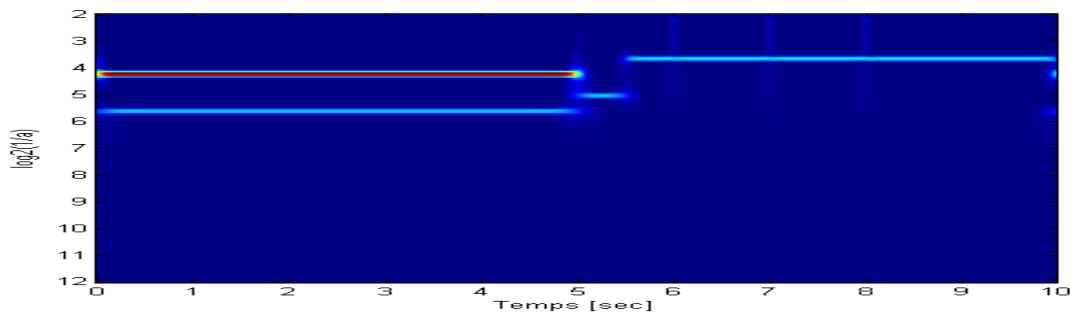


Fig.4.24: Représentation temps échelle du signal en utilisant la transformée en ondelette.

Alors, on déduit que la transformée en ondelette pour le cas d'un signal non stationnaire présente plusieurs avantages que la transformée rapide de Fourier ou la transformée de Fourier à fenêtre glissante. Elle donne le meilleur compromis entre la résolution en temps et en fréquence permettant ainsi une visualisation simultanée des tous les phénomènes (les impulsions de Dirac et la somme des sinusoïdes).

## IV.2. Etude comparative

Cette étude consiste à l'application des trois techniques de traitements de signal considérées précédemment. Et, ce pour l'analyse du courant statorique de deux types de génératrice notamment une génératrice asynchrone auto excitée et une génératrice à double alimentation. Ceci, dans le but de détecter et localiser d'éventuels défauts.

### IV.2.1. Cas de la génératrice asynchrone auto-excitée

- 1<sup>er</sup> cas : Nous nous appliquons les différentes méthodes de traitement de signal pour l'analyse de courant statorique de la génératrice asynchrone auto-excitée sans défaut



installé dans une chaîne éolienne avec l'application de la charge à  $t=2$  sec.

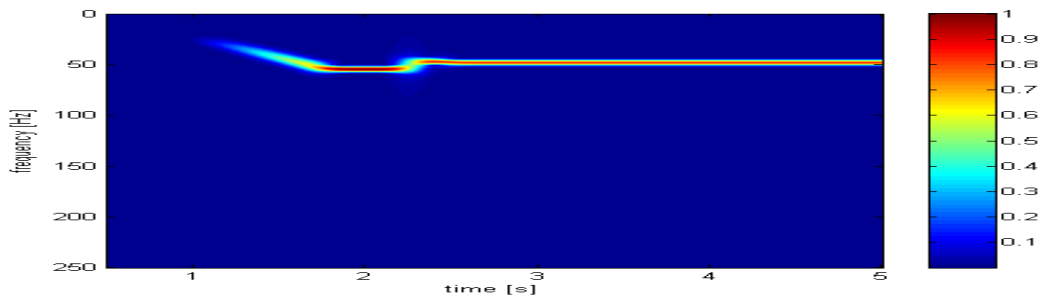


Fig.4.25 .Analyse temps fréquence du courant par STFT pour le cas sain.

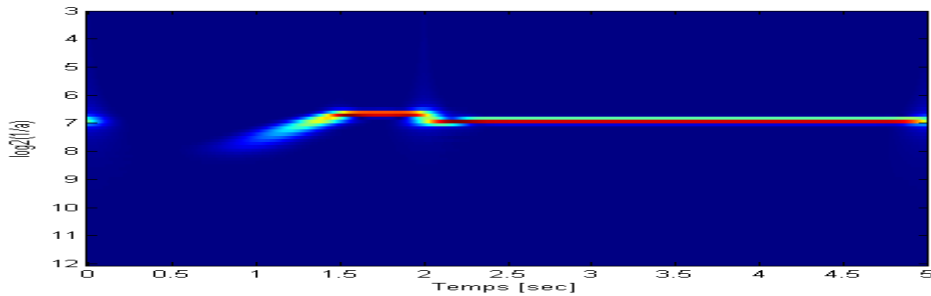


Fig.4.26 .Analyse temps échelle du même courant en utilisant la transformée en ondelette.

- 2<sup>ème</sup> cas : Même simulation mais cette fois la génératrice asynchrone auto-excitée est avec défaut de rupteur de barre rotorique à  $t=3$  sec.

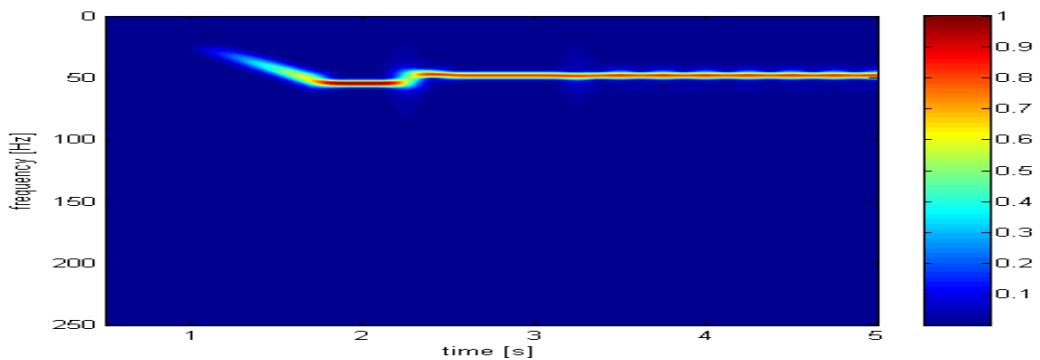


Fig.4.27 .Analyse temps fréquence du courant par « STFT » pour le 2<sup>ème</sup> cas.

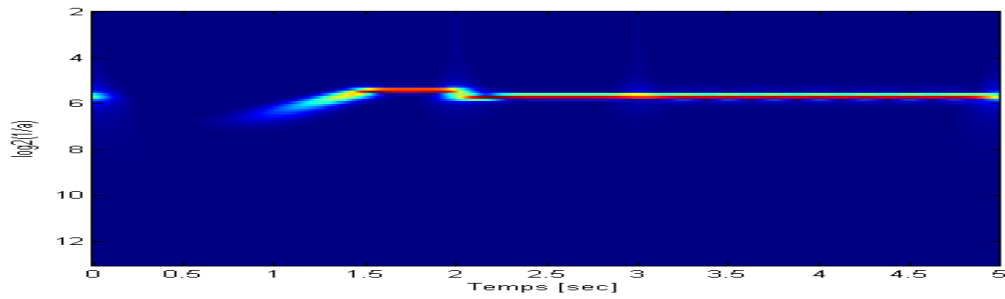


Fig.4.28 .Analyse de courant pour le 2<sup>ème</sup> cas en utilisant la transformée en ondelette.

- 3<sup>ème</sup> cas : Même simulation mais cette fois la génératrice asynchrone auto-excitée est avec défaut de rupteur de barre progressif rotorique à t=3, 4, 5,6 et 7sec.

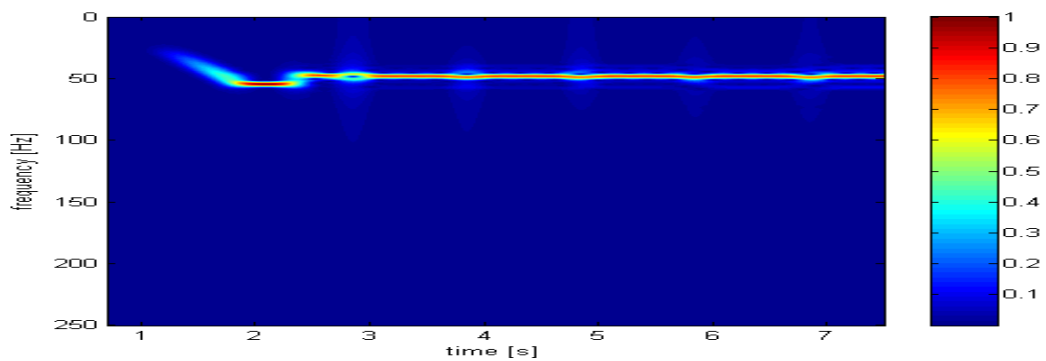


Fig.4.29 .Analyse temps fréquence du courant par “STFT ” pour le 3<sup>ème</sup> cas.

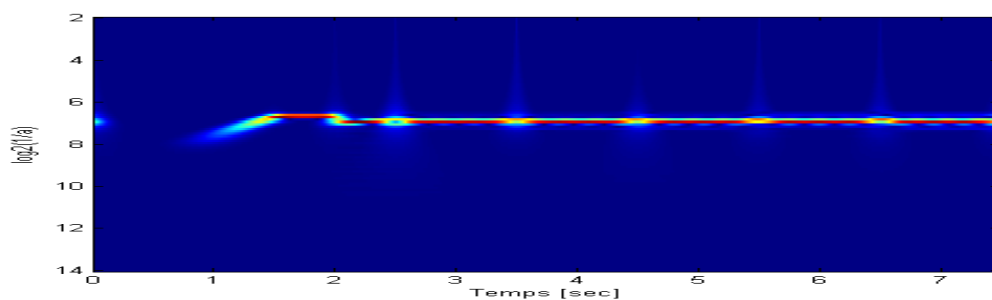


Fig.4.30 .Analyse de courant pour le 3<sup>ème</sup> cas en utilisant la transformée en ondelette.

- 4<sup>ème</sup> cas : L'analyse de courant statorique de la génératrice asynchrone démarré avec une rupture d'annaux rotorique à t=0 sec.

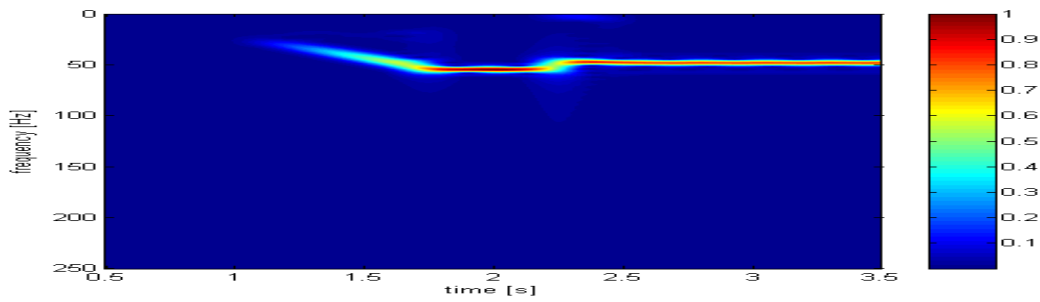


Fig.4.31 .Analyse temps fréquence du courant par “STFT » pour le 4<sup>ème</sup> cas.

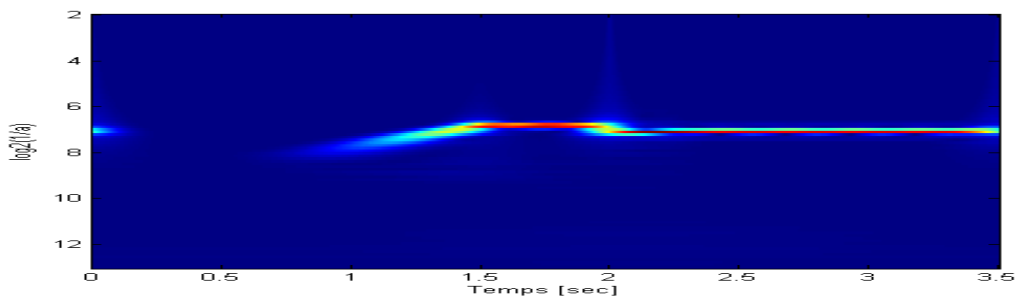


Fig.4.32.Analyse de courant pour le 4<sup>ème</sup> cas en utilisant la transformée en ondelette.

#### IV.2.2. Cas de la génératrice asynchrone double alimentation

- 1<sup>er</sup> cas : Nous nous appliquons les différentes méthodes de traitement de signal pour l’analyse de courant statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation sans défaut installé dans une chaîne éolienne avec la variation de la vitesse de rotation à t=2.5 seconde et la tension rotorique à t=2.5 seconde.

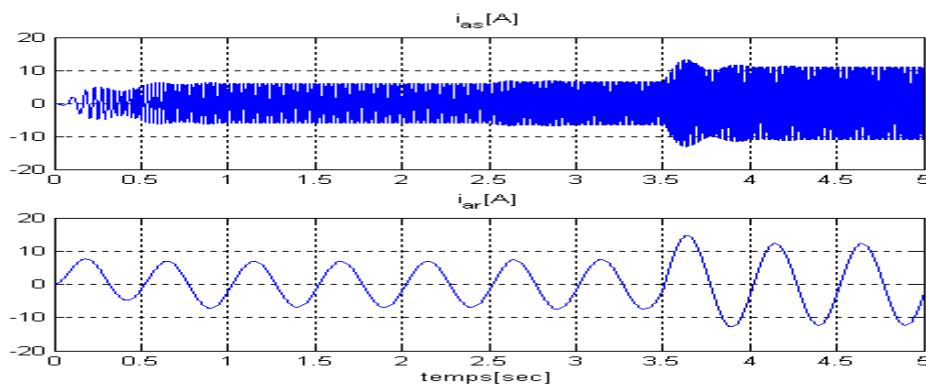


Fig.4.33 .Courant statorique et rotorique dans le cas sain.

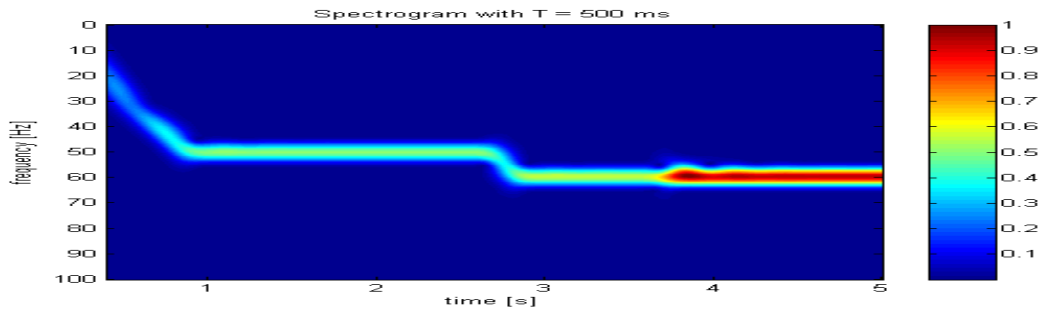


Fig.4.34 .Analyse temps fréquence du courant statorique par STFT pour le cas sain.

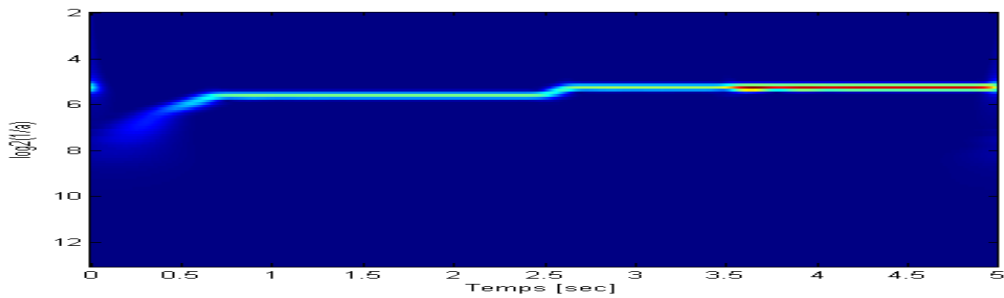


Fig.4.35 .Analyse temps échelle du même courant en utilisant la transformée en ondelette.

- 2<sup>ème</sup> cas : Même simulation mais cette fois la génératrice asynchrone avec défaut d'excentricité statique à t=2 sec à vitesse et tension rotorique constante.

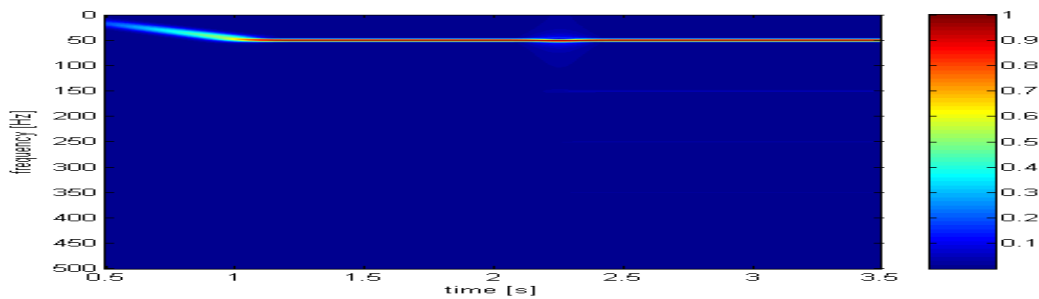


Fig.4.36 .Analyse temps fréquence du courant statorique par STFT.

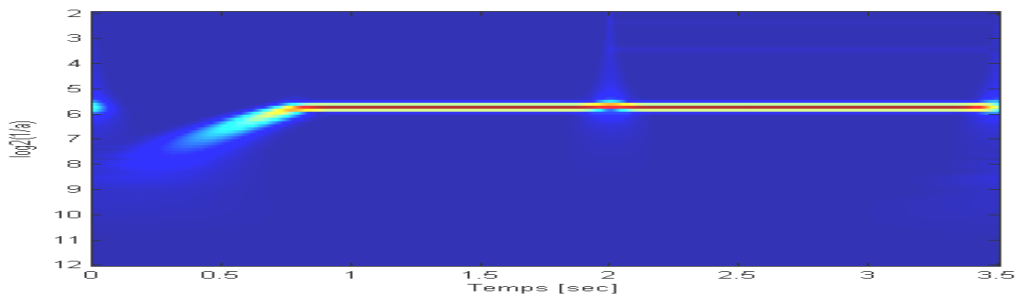


Fig.4.37 .Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en ondelette.



- 3<sup>ème</sup> cas : Même simulation mais cette fois la génératrice asynchrone avec défaut d'excentricité dynamique.

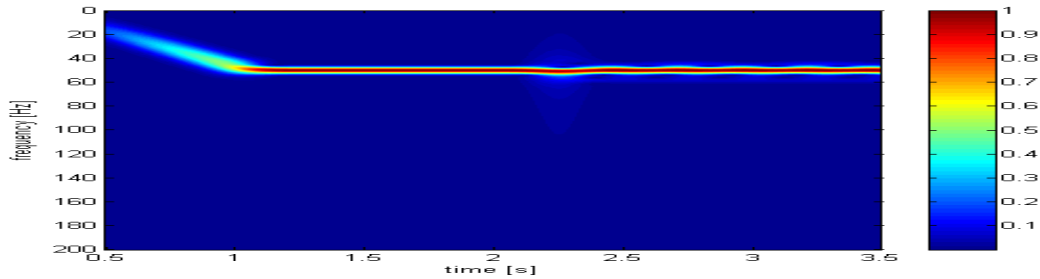


Fig.4.38 .Analyse temps fréquence du courant en utilisant la transformée en STFT.

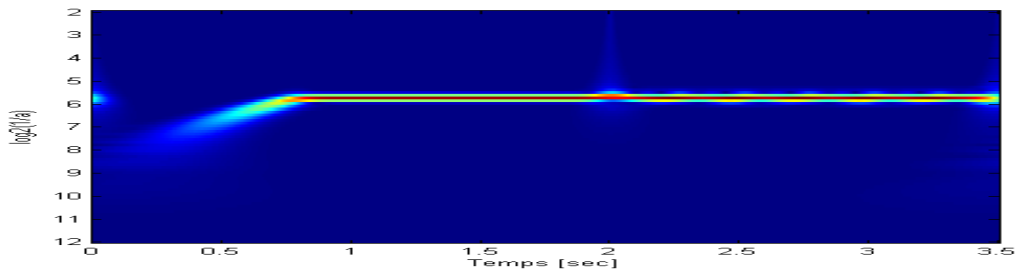


Fig.4.39 .Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en ondelette.

- 4<sup>ème</sup> cas : Même simulation mais cette fois la génératrice asynchrone avec défaut d'excentricité mixte.

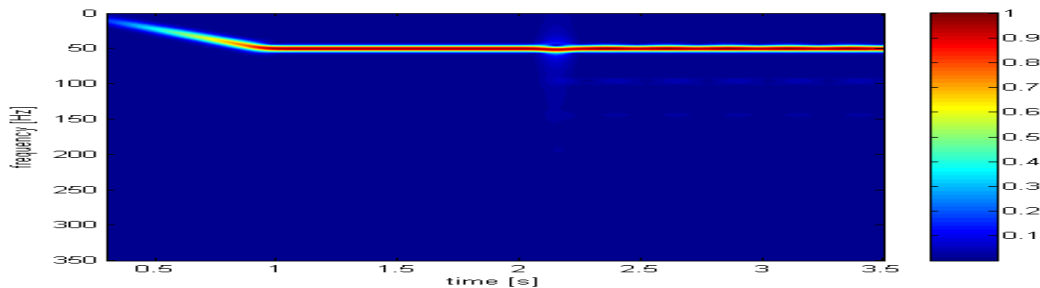


Fig.4.40 .Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en STFT.

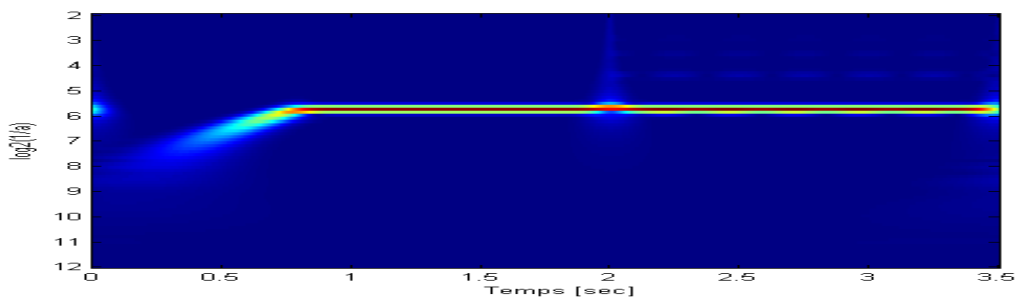


Fig.4.41 .Analyse temps échelle du courant en utilisant la transformée en ondelette.

### **II.3. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné des définitions et les propriétés de différentes méthodes de traitement de signal. Nous avons commencé par donner des généralités et les applications principales de l'analyse par la transformation rapide de Fourier, puis nous présentons la Transformée de Fourier sur fenêtre glissante et les principaux désavantages de cette analyse. Par la suite, nous nous sommes intéressés à la transformée en ondelettes que nous avons utilisée sur le courant de la génératrice asynchrone pour la détection des différents défauts dans les deux types de machine asynchrone installée dans une chaîne de conversion éolienne. Des résultats de simulation sont présentés et interprétés.

Nous avons mis en évidence que l'analyse du courant statorique de la génératrice permet par analogie au comportement de la machine en régime moteur de détecter et diagnostiquer les défauts. Les fréquences qui apparaissent lors de la présence de ces types de défauts dépendent de la fréquence fondamentale et du glissement de la machine.



## **Conclusion Générale**

A l'issue de ce travail, nous concluons que les chaînes éoliennes sont généralement dotées de génératrices asynchrones. Cette machine présente le composant principale de la chaîne. Cependant, son arrêt intempestif causera inévitablement des conséquences économiques inestimables. Donc, il est impératif de prévoir des systèmes de surveillances qui permettront de détecter précocement le défaut afin de remédier avant que l'installation s'arrête.

Dans cet objectif, nous avons considéré dans ce mémoire, deux types de génératrices, (auto- excitée et à double alimentation), pour lesquelles nous avons appliqué une modélisation de circuits maillés qui s'est révélée adéquate pour la détection des défauts éventuels une telle machine.

Les résultats de simulations illustrés dans les divers chapitres, prouvent la validé des models retenus et leur efficacité.



## **Références**

- [1] R. Maouedj, S. Bousalm, Y. Hadji & B. Benyoucef, “ Application de l’Énergie Éolienne au Pompage Hydraulique au Sud Algérien ”, 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering 27 - 29 October 2008.
- [2] L. Abdelhamid, R. Abdessemed et H. Amimeur, “ Etude et Simulation des Différentes Génératrices Utilisées dans les Systèmes Eoliens ”, 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering 27 - 29 October 2008.
- [3] L.M. Hansen, P.H. Madsen, F. Blaabjerg, H.C. Christensen, U.Lindhard, and K. Eskildsen, “Generators and power electronics technology for wind turbines”, Record of IEEE-IECON-2001, pp 2000–2005.
- [4] W.T. Thomson and R. J. Gilmore, “Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives—fundamentals, data interpretation, and industrial case histories”, Proceedings of the thirty-second turbo machinery symposium, 2003, pp.145-156.
- [5] Ackemann T, soder L ;An Overview of wind energy-Status 2002. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2002,Vol.6;pp.67-68.
- [6] <http://www.windpowre.org>
- [7] G.O.Cimuca, “Système inertiel de stockage d’énergie associé à des générateurs Eolienne” Thèse de doctorant, école nationale supérieur d’arts et métiers centre de lille, 2005.
- [8] H.Camblong, “Minimisation de l’impact des perturbation d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des générateur à vitesse variable ” Thèse de doctorant, L’école nationale supérieur d’arts et métiers, 2003.
- [9] D. Kairous, S. Mekhtoub, R. Ibtouen, O. Touhami, “ Modèle d’un générateur asynchrone auto-amorcé lors d’un retour réseau ”, Algerian Journal of Technology,P49-55, ENP,2005.
- [10] Van Kuik G,Is Research Ready ?What drives the development?. GlobalPower; Conference Proceedings, Paris, 2002.
- [11] Lin, Yu-Jen, “Wind Turbine Generators Fault Ride-Through Capability - A Comparison Study of SCIG and DFIG” Conference Proceedings, Paris, 2008.
- [12] A. Belkaid and A. Gherbi, “Modélisation d’un Système de Production d’Électricité Éolienne Couplé à des Batteries Electrochimiques ”, 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering 27 - 29 October 2008.
- [13] J. Martin, “Energies éoliennes”, Techniques de l’Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.





---

---

## *Références*

---

---

- [14] J.L. Menet, L.-C. Valdès, B. Ménart, "A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- $\sigma$  criterion", *Renewable Energy* 22, 2001, pp. 491-506.
- [15] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", *Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique*, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [16] F. Poitiersp, "Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", *Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes*, pp.14-18 2003.
- [17] Bossanyi E.A, "The design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines", *Wind Energy*, 2000, Vol.3, pp.149-160.
- [18] K. Laid, "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique", *Thèse de Magister, Université de Batna*, pp 5-20. 2003.
- [19] E.Hau, "Wind turbines", Springer, 2000.
- [20] B.Denis, V. Paredes, "L'énergie Eolienne", *Projet De Machines thermiques, Insa lyon*, pp.34-35, 2004
- [21] L.Krichen, B. François et A.Ouali, "Modélisation, commande et interaction de deux éoliennes à vitesse variable", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 10, N°2, 2007, pp 225 – 230.
- [22] E.S. Abdin and W. Xu, "Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine Induction Generator Unit", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 15, N°1, pp. 91 – 96, March 2000.
- [23] I. Vechiu, "L'optimisation de la récupération de l'énergie éolienne. Simulation en temps réel d'une turbine éolienne sous l'environnement Matlab", *DEA d'électrotechnique de l'Université du Havre*, 2002.
- [24] L. Leclercq, "Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes", *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille*, Décembre 2004.
- [25] J.Slootweg, S. De Haan, H. Polinder et W. Kling, "General model for representing variable speed wind turbine in power system dynamics simulation", *IEEE Transactions on Power Systems* vol.18 (2003), N°1.
- [26] S. Taraft, D. Rekioua et D. Aouzellag, "Système de Stockage Inertiel Dédie aux Eoliennes Connectées au Réseau", *5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering* 27 - 29 October 2008.



---

---

## *Références*

---

---

- [27] E. Muljadi, T.A. Lipo, "Series Compensated PWM Inverter with Battery Supply Applied to an Isolated Induction Generator", IEEE Trans. Indus. Appl., Vol. 30, N° 4, Juillet-Août 1994, pp 1073-1082.
- [28] A.Menacer, M.Said, N.Said, "Stator Current Analysis Of Incipient Fault Into Asynchronous Motor Rotor Bars Using Fourier Fast Transform", Journal of Electrocal Engineering, Vol. 55, NO. 5-6, 2004, pp122-130.
- [29] J. Chatelain, "Machines électriques", Tome 1, Dunod, ISBN 2-04-015620-8, 1983.
- [30] F. Poitiers, M. Machmoum, M.E. Zaim and R. Le Doeuff, "Performances and Limits of an autonomous Self-Excited Induction Generator", Universities Power Engineering Conference, September 2001, CD-ROM proceedings.
- [31] F. Poitiers, "Performances et Limites d'une Génératrice Asynchrone Autonome Auto-Excitée. Application à l'Energie Eolienne.", Actes de JCGE'01, Nancy, 14 et 15 novembre 2001, pp. 113-117.
- [32] S. Mekhtoub, T. Khaldi, M. Ivanec, "Amplitude des Courants et du Couple de Reconnexion d'une Machine Asynchrone Auto-Amorcée", RIGE – 4/2001, Numélec' 2000, pp 149-172.
- [33] A.H. Al-Bahrani, "Analysis of Self-Excited Induction Generators Under Unbalanced Conditions", Electric Machines and Power Systems, 24, 1996, pp. 117-129.
- [34] L. Wang, R-Y Deng, "Transient Performance of an Isolated Induction Generator under Unbalanced Excitation Capacitors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, N° 4, December 2003, pp 887-893.
- [35] F. Poitiers, M. Machmoum, M.E. Zaim, and T. Branchet, "Transient Performances of a Self-Excited Induction Generator Under Unbalanced Conditions", International Conference on Electrical Machines, CD-ROM proceedings, Brugge, August 2002.
- [36] E. Merabet, R. Abdessemed, H. Amimeur, F. Hamoudi, L. Abdelhamid, "Influence de la Charge sur une Génératrice Asynchrone Double Etoile (GASDE)", International Conference on Renewable Energy ICRE'07, University of Bejaia, 25-27 Nov. 2007, pp. 63-68 (CDROM).
- [37] B. Singh, M. V. Verma, A. K. Tandon, "Rating Reduction of Static Compensator for Voltage Control of Three-Phase Self-Excited Induction Generator", in IEEE ISIE, Montréal, Québec, Canada, July 9–12 2006, pp. 1194–1199.
- [38] S. El Aimani, "Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, Décembre 2004.



- [39] L. Krichen and A. Ouali, "Voltage Stability and Dynamic Performances Analysis of Wind Turbine Induction Generator Unit", *Electrimacs 2005*, Hammamet, Tunisie, 17-20 Avril 2005.
- [40] G.D. Marques, "Numerical Simulation Method for the Slip Power Recovery System", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 146, N° 1, January 1999, pp 17-24.
- [41] S.EL. Aimani, B. Francois, F. Minne, B. Robyns, "Modelling and simulation of Doubly fed induction generators for speed wind turbine integrated in an distribution network", *EPE 2003*.
- [42] T. J. Sobczyk, A. Izvorski, "Recognition of rotor eccentricity of induction motor based on the fourier spectra of phase currents", *Proc. ICEM'98*, pp 408 – 413 , Vol 1, september 2 - 4 1998 Istanbul Turkey.
- [43] R. CASIMIR, "Diagnostic Des Défauts Des Machines Asynchrones Par Reconnaissance Des Formes", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de Lyon, Soutenue le 18 décembre 2003.
- [44] D. G. Dorrell, W. T. Thomson, S. Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 33, no. 1, pp. 24-34, Jan.-Feb. 1997.
- [45] S. Nandi, R. M. Bharadwaj, H. A. Toliyat; "Mixed eccentricity in three phase induction machines: analysis, simulation and experiments", *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference*, vol. 3, pp.1525-1532, Oct. 2002.
- [46] R. R. Schoen, "On-Line Current-Based Condition Monitoring of Three-Phase Induction Machines", Ph.D. Dissertation, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, August 1994.
- [47] P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery". New York: McGraw-Hill, 1986.
- [48] S. Nandi, R. M. Bharadwaj, H. A. Toliyat, "Performance analysis of a three-phase induction motor under mixed eccentricity condition", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 3, pp. 392-399, Sep. 2002.
- [49] Long Wu, "Separating Load Torque Oscillation And Rotor Faults In Stator Current Based-Induction Motor Condition", Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Georgia Institute of Technology, May 2007.
- [50] M. Blodt, J. Regnier, and J. Faucher, "Distinguishing load torque oscillations and eccentricity faults in induction motors using stator current wigner distributions", *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference*, Oct. 2006.



---

---

## *Références*

---

---

- [51] S. Petropol, *Ondelettes et Diagnostic, "Application aux Défaits Diélectriques et Electriques des Machines Tournantes"*, Doctorat de l'INPG, Septembre 2001.
- [52] S. Wu and T.W.S. Chow, "Induction Machine Fault Detection Using SOM-Based RBF Neural Networks", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, N° 1, pp 183-194, February 2004.
- [53] Baron Jean Baptiste Fourier, (see, e.g., <http://bartleby.com/65/fo/Fouriers.html>).
- [54] J. Dumas – F. Lambert, "Analyse Fréquentielle (premier niveau)", 01dB industries 05/09/1996 pp 4.
- [55] Levent Sevgi, "Numerical Fourier Transforms DFT and FFT", IEE, Institution of Electrical Engineers, 2004
- [56] Prof. M.etique et Prof. F.Mudry, livre, "Traitement de signal (Signaux et Systèmes)", Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud, pp 14), mars 2006, Yverdon-les-Bains
- [57] L. SevGi, F. klem`, L.B. Felsen, "Ground Wave Propagation Modeling: Problem-matched Analytical Formulations and Direct Numerical Techniques", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 44, Nm.1, pp.55-75, Feb. 2002
- [58] A Ouahabi, W. Rmili, "analyse temps fréquence appliquée aux signaux vibratoires relevés en tournage", 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007
- [59] V. Perrier, "Application de la théorie des ondelettes", Enseignement UNESCO Traitement du signal et des images numériques, Tunis, ENIT, 14-18 mars 2005
- [60] T.Boumegoura, "Recherche de signature electromagnetique des défaut dans une machine asynchrone et synthese d'observateurs en vue du diagnostic", These de doctorant mars 2001
- [61] M. Blodt, M. Chabert, J. Faucher and B. Dagues, "Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis", IEMDC 2005 15-18 MAI 2005, San Antonio, TEXAS.
- [62] Bardet, J.M. and Bertrand, P.R. (2008), "A nonparametric estimation of the spectral density of a continuous-time Gaussian Process observed at random times", soumis (2008), arXiv:0805.0074.
- [63] Prof. Willy Hereman, "Introduction to WAVELETS: Theory and Applications", Dept. of Mathematical and Computer Sciences March 9-23, 2001
- [64] O. Mustapha, "Contribution à la détection des changements dans les signaux temporels pour la sûreté de fonctionnement des systèmes", Thèse de doctorant, 11-2008



---

---

*Références*

---

---

[65] A. Mouloud, “ Application de la transformée en ondelette à l'analyse des signaux vibratoires d'un système d'engrenage en vue d'un diagnostic précoce ”, 4<sup>th</sup> International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007 03-04 November 2007

[66] X.Chimentin, L.asolofondraibe, F.Bolaers,B.Pottier, J.-P.l Dron, “ Détection précoce de défaut de roulement par adaptation d'ondelette aux signaux de type choc ”, 12<sup>eme</sup> Colloque National de la Recherche en IUT, Brest,pp2-3 1-2 juin 2006.

