

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie  
قسم الآلية و الكهروتقني  
Département d'Automatique & d'Électrotechnique



# Mémoire de Master

en Electrotechnique  
Spécialité : Machines Électriques

Présenté par

**Bekhoucha Imad-Eddine Massinissa**

## Diagnostic d'une chaîne éolienne à base d'un générateur autonome

Proposé par : **R. Hachelaf**

Année Universitaire 2022-2023

## Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier Dieu tout-puissant qui m'a guidé tout au long de ce chemin jusqu'à atteindre ces niveaux.

Je tiens donc à remercier sincèrement mes deux professeurs, **R. Hachelaf** et **D. Kouchih**, pour leur soutien et leurs conseils, ainsi que pour leur compréhension et leur confiance en moi tout au long de ce travail.

Sans oublier de remercier tous ceux qui ont pu aider de près ou de loin car pour cela je leur suis très reconnaissant

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude envers ma famille qui m'a poussé tout au long de ces dernières années avec beaucoup de croyance et d'encouragement ainsi que leur soutien moral indéfectible.

## Dédicace

Je dédie cet humble travail à :

Mes chers parents **Zennadi Samia** et **Bekhoucha Samir** pour leur patience et leur encouragement ainsi que leur aide morale et financière vu que sans eux je ne serais la personne que je suis aujourd'hui.

et mon frère **Mohamed Lamine** pour ses encouragements et son aide la plus précieuse.

sans oublier **Imoussaine Rofaida** pour son incroyable soutien moral ainsi que son aide incommensurable, dont je lui suis infiniment reconnaissant et que j'apprécie énormément.

Finalement, je dédie ce mémoire à mon ami **Temmar Billel** ainsi qu'à toutes les personnes que j'ai pu côtoyer au sein du club **ITC**, avec lesquelles j'ai pu passer les meilleurs moments, remplis de positivité, durant mon parcours universitaire.

**Bekhoucha Imad eddin**



## ملخص:

يبرر النمو السريع لصناعة طاقة الرياح الحاجة إلى تطوير طرق تشخيص تنبؤية للمولدات غير المتزامنة. في هذه الدراسة، سنختبر بشكل أساسي نموذجين مختلفين للمولد غير المتزامن من أجل فحص طرق تشخيصه، حيث سندرس بمزيد من التفصيل الطرق المختلفة لتحليل إشارات الكهربية لهذا النظام، ولا سيما تحويل فورييه السريع وتحويل الموجات، من أجل استخراج الإشارات اللازمة لتشخيص النظام ككل.

**الكلمات المفتاحية:** مولد غير متزامن، دائرة قصيرة بين لفات العضو الثابت، التشخيص، تحويل فورييه السريع، الموجة.

---

## Résumé :

La croissance rapide de l'industrie de l'énergie éolienne justifie la nécessité de développer des méthodes de diagnostic prédictif pour les générateurs asynchrones. Dans cette étude, nous testerons essentiellement deux modèles différents pour la génératrice asynchrone afin d'examiner les méthodes de diagnostic par la suite, où nous étudierons plus en détail les différentes méthodes d'analyse des signaux, en particulier la transformée de Fourier rapide et la transformée en ondelettes, afin d'extraire les signaux nécessaires au diagnostic du système dans son ensemble.

**Mots clés :** Génératrice asynchrone, défaut de court-circuit de spire, diagnostique, FFT, Ondelette.

---

## Abstract :

The rapidly growing wind energy industry justifies the need to develop predictive diagnostic methods for asynchronous generators. In this study, we will mainly try out two different models for the asynchronous generator in order to look at the diagnostic methods later on, where we will look in more detail at the different ways of signal analysis, in particular the fast Fourier transform and the wavelet transform, in order to extract the signs needed for the diagnosis of the whole system.

**Keywords:** Asynchronous generator, short-circuit winding defect, diagnostics, FFT, Wavelet.

# Listes des acronymes et abréviations

---

**F.é.m** : force électromotrice.

**GACE** : Génératrice asynchrone à cage d'écurielle

**MASRe** : Machine asynchrone à résistance rotorique variable

**MSAP** : machine synchrone à aimants permanents

**MADA** : Machine asynchrone à double alimentation

**FFT** : Fast fourier transformation ( transformation de fourier rapide ).

**MEF** : Méthode des éléments finis.

Remerciements

Résumé

Listes des acronymes et abréviations

Table des matières

Liste des figures

Introduction générale ..... 1

**Chapitre 1 : Généralité sur les génératrices asynchrones dans les systèmes éoliens**

1.1. Introduction ..... 4

1.2. Descriptif des énergies éoliennes ..... 4

1.2.1. Généralité sur les éoliennes ..... 4

1.2.2. La composition des éoliennes ..... 5

1.2.2. Les différents types de générateurs au cœur des éoliennes ..... 7

1.3. Les chaînes de conversion de l'énergie éolienne ..... 8

1.3.1. Système à vitesse fixe - machine asynchrone à cage ..... 8

1.3.2. Système à vitesse fixe - Machine synchrone à aimants permanents ..... 9

1.3.3. Système à vitesse variable - Machine asynchrone à rotor bobiné ..... 10

1.3.4. Système à vitesse variable - Machine asynchrone à double alimentation .. 10

1.4. Classification des machines électriques ..... 11

1.5. Étude et fonctionnement des machines asynchrone ..... 12

1.5.1. Élément fondamental à la composition d'une machine asynchrone ..... 13

1.5.2. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone ..... 14

1.6. Les différentes méthodes utilisées pour la modélisation des générateurs asynchrones ..... 15

1.6.1. Modélisation de la machine dans le plan triphasé "abc" ..... 16

1.6.2. Modélisation de Park biphasé..... 16

1.6.3. Modélisation à base des méthodes numérique " Élément finie " ..... 16

1.7. Les différents défauts des machines asynchrones à cage .....	17
1.8. Les défauts statoriques .....	18
1.8.1. Les défauts d'isolant dans un enroulement .....	18
1.8.2. Les défauts de court-circuit entre spires statoriques .....	19
1.8.3. Les défauts de court-circuit dans une phase .....	19
1.8.4. Les défauts de circuit ouvert sur une phase .....	20
1.8.5. Les défauts de court-circuit entre phases .....	20
1.8.6. Les défauts de tension entre phases déséquilibrées .....	20
1.9. Les défauts rotoriques .....	21
1.9.1. Rupture de barres .....	21
1.9.2. Rupture d'anneau de court-circuit .....	22
1.9.3. Excentricité statique et dynamique .....	22
1.9.4. Court-circuit dans les enroulements rotoriques .....	23
1.10. Défaillance d'ordre mécanique .....	23
1.11. Les différentes méthodes de diagnostic .....	24
1.11.1. Technique de traitement de signal utilisé pour la diagnostique des défaut .....	25
1.12. Conclusion .....	26
 <b>Chapitre 2 : Modélisation de la génératrice asynchrone à l'état sain</b> 	
2.1. Introduction.....	28
2.2. La génératrice asynchrone à cage.....	28
2.3. Modèle "abc" de la génératrice à cage.....	30
2.3.1. Equations des tensions de la génératrice .....	31
2.3.2. Détermination des courants de la génératrice .....	35
2.3.3. Model d'état dans le repère "abc" de la GACE .....	36
2.4. Modèle de Park de la génératrice à cage.....	37
2.4.1. Choix du référentiel (d,q) .....	38

2.4.2. Les équations électriques du modèle de Park.....	39
2.4.3. Equation d'auto excitation de la machine .....	41
2.5. L'effet de saturation dans la GACE .....	42
2.5.1. Le phénomène de saturation croisée.....	43
2.5.2. Modèle saturé de la GACE dans le repère de Park.....	43
2.6. Simulation et analyse des résultats.....	45
2.6.1. Simulation en régime linéaire .....	46
2.6.2. Simulation en régime de saturation.....	48
2.7. Conclusion.....	50

**Chapitre 3 : Modélisation et analyse de la génératrice asynchrone à l'état défectueux**

3.1. Introduction .....	52
3.2. La génératrice asynchrone à cage en défaut .....	52
3.3. Les défauts de court-circuit entre spires statoriques .....	53
3.3.1. Définition .....	53
3.3.2. Influence d'un court-circuit sur les courants de ligne .....	54
3.4. Modélisation de la GACE en défaut .....	55
3.4.1. Mise en équations de la machine .....	55
3.5. Méthode d'analyse des défauts par traitement du signal .....	58
3.6. Transformation de Fourier rapide .....	58
3.6.1. Définition .....	58
3.6.2. Exemple d'application de la transformée de Fourier FT .....	59
3.7. Les ondelettes .....	60
3.7.1. Définition .....	60
3.7.2. Transformée en ondelettes continue .....	61
3.7.3. Transformée en ondelettes discrètes .....	62
3.7.4. Critère du choix de l'ondelette mère et l'ordre de décomposition .....	64

3.8. Simulation et analyse des résultats .....	65
3.8.1.Simulation de la GACE en défaut de court-circuit entre spires .....	66
3.8.2.Analyse spectrale des signaux de la machine .....	68
3.8.3.Décomposition des ondelette .....	71
3.9. Conclusion.....	74
Conclusion générale .....	76
Bibliographie	

**Chapitre 1 : Généralité sur les génératrices asynchrones dans les systèmes éoliens**

Figure 1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	5
Figure 1.2. Composition d'une éolienne .....	5
Figure 1.3. Schéma de principe d'un entraînement à vitesse fixe .....	8
Figure 1.4. Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable - machine synchrone à aimants permanents MSAP .....	9
Figure 1.5. Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable - machine asynchrone à résistance rotorique variable MASRe .....	10
Figure 1.6. Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable - machine asynchrone à double alimentation MADA .....	11
Figure 1.7. Classification des machines électriques .....	12
Figure 1.8. Vue éclatée d'un moteur asynchrone électrique .....	14
Figure 1.9. Distribution des défauts des machines électriques .....	18
Figure 1.10. Les différents défauts du court-circuit statorique .....	19
Figure 1.11. Défaut d'une barre cassée .....	21
Figure 1.12. Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit .....	22
Figure 1.13. Différents types de la dissymétrie de l'entrefer .....	23

**Chapitre 2 : Modélisation de la génératrice asynchrone à l'état sain**

Figure 2.1. Coupe d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil .....	28
Figure 2.2. Glissement d'une génératrice asynchrone .....	30
Figure 2.3. Disposition des enroulements de la machine asynchrone triphasée .....	31
Figure 2.4. Distribution des condensateurs pour une génératrice asynchrone	33
Figure 2.5. Représentation de la machine asynchrone dans le repère diphasé .....	37
Figure 2.6. Courbe de la première aimantation d'un matériau ferromagnétique .....	43
Figure 2.7. Schéma bloc de la génératrice asynchrone .....	46

Figure 2.8. Vu détaillé du schéma bloc de la génératrice asynchrone .....	46
Figure 2.9. Les courants et tension statorique de la génératrice en régime linéaire .....	47
Figure 2.10. Les flux statiques et le couple électromagnétique de la génératrice en régime linéaire .....	47
Figure 2.11. Les courants statoriques de la génératrice en régime de saturation .....	48
Figure 2.12. Les flux statoriques et le couple électromagnétique de la génératrice en régime de saturation .....	49
Figure 2.13. influence de la capacité C sur la tension .....	49

**Chapitre 3 : Modélisation et analyse de la génératrice asynchrone à l'état défectueux**

Figure 3.1. Les causes internes des défauts de la génératrice asynchrone à cage .....	53
Figure 3.2. Les causes externes des défauts de la génératrice asynchrone à cage .....	53
Figure 3.3. Schéma de principe d'un défaut entre spires sur une phase statorique "as" .....	54
Figure 3.4. Circuit du stator avec une schématisation d'un défaut dans la phase "as" .....	55
Figure 3.5. Représentation de la FFT temporelle vers fréquentielle .....	59
Figure 3.6. Représentation temporelle et fréquentielle de la FFT pour la somme de deux sinusoïdes .....	59
Figure 3.7. Représentation temporelle et fréquentielle de la FFT pour une succession de deux sinusoïdes .....	60
Figure 3.8. Représentation de la transformée vers ondelette .....	61
Figure 3.9. Quelques formes des ondelettes usuelles .....	62
Figure 3.10. Représentation de la décomposition du signal d'origine .....	63
Figure 3.11. Les courants et un agrandissement du signal de la génératrice asynchrone en défaut .....	66
Figure 3.12. Les tensions et flux de la génératrice asynchrone en défaut .....	66

Figure 3.13. Le couple électromagnétique de la génératrice asynchrone en défaut .....	67
Figure 3.14. Le spectre du courant statorique de la génératrice à l'état sain ...	68
Figure 3.15. Le spectre du courant statorique de la génératrice à l'état défectueux avec $\mu = 5\%$ .....	69
Figure 3.16. Le spectre du courant statorique de la génératrice à l'état défectueux avec $\mu = 10\%$ .....	69
Figure 3.17. Décomposition multi-niveau du courant statorique "ias" à l'état sain .....	71
Figure 3.18. Décomposition multi-niveau du courant statorique "ias" à l'état sain avec charge .....	72
Figure 3.19. Décomposition multi-niveau du courant statorique "ias" en présence de défaut 5% .....	72
Figure 3.20. Décomposition multi-niveau du courant statorique "ias" en présence de défaut 10% .....	73

**Chapitre 3 : Modélisation et analyse de la génératrice asynchrone à l'état défectueux**

Tableau 3.1. Fréquence et amplitude de la génératrice à l'état sain .....	68
Tableau 3.2. Fréquence et amplitude de la génératrice en défaut de $\mu = 5\%$ ..	69
Tableau 3.3. Fréquence et amplitude de la génératrice en défaut de $\mu = 10\%$ .	70

## Introduction générale

La production d'électricité est l'un des aspects les plus essentiels du quotidien et avec le déclin des énergies fossiles et la volonté de construire un avenir plus vert, plusieurs sources d'énergie renouvelables voient le jour, notamment dans le domaine des éoliennes. Celles-ci permettent principalement de convertir l'énergie du vent pour en faire de l'électricité grâce aux générateurs ; or ces derniers jouent un rôle primordial dans ce processus. La présente étude se focalise essentiellement sur les générateurs asynchrones, étant donné qu'il s'agit du générateur le plus répandu dans les applications liées à l'énergie éolienne. L'objectif est donc de se pencher sur leur conception et leur modélisation afin de mieux comprendre les risques potentiels en cas de défaillance. Justifiant la nécessité d'examiner les différentes méthodes de diagnostic et d'analyse des différents signaux de ces générateurs.

Ainsi, cette étude sera réalisée à travers une simulation Matlab et Simulink afin d'obtenir une comparaison précise entre les différentes approches et méthodes de diagnostic utilisées dans ce type de générateurs.

Ce qui permet de diviser ce mémoire en 3 chapitres principaux :

- Dans ce premier chapitre, il sera abordé une brève introduction au monde des sources d'énergie renouvelables, avec une perspective sur les différentes génératrices utilisées. Dont une attention particulière sera accordée aux générateurs asynchrones et à leur composition. Leurs divers défauts qui peuvent survenir, tant sur le plan électrique que mécanique, qui seront également examinés en détail et sans oublier les méthodes de diagnostic qui permettent d'analyser ses machines.
- Dans le deuxième chapitre, la réflexion évoluera et se concentrera sur la modélisation de la génératrice asynchrone pendant son fonctionnement idéal. Une étude approfondie de son mode opératoire et des différentes approches de modélisation utilisées, ainsi que de leurs résultats et équations spécifiques,

# Introduction générale

---

sera réalisée. Enfin, ce chapitre se termine par la présentation des résultats issus de la simulation de la progression des signaux émis par cette génératrice asynchrone.

- Enfin, dans le dernier chapitre, nous verrons une autre modélisation de la machine mettant en évidence un court-circuit dans les spires statorique. Ainsi, le problème sera identifié afin de mieux le concevoir et l'analyser de manière plus approfondie, différentes approches seront utilisées. La première approche fera appel à la transformation de Fourier rapide et ses différents modes de fonctionnement, quant à la deuxième, elle fera appel aux ondelettes.

**Chapitre 1:**  
**Généralité sur les génératrices**  
**asynchrones dans les**  
**systèmes éoliens**

### 1.1. Introduction

Avec le déclin constant des combustibles fossiles et le besoin croissant d'une énergie plus renouvelable, les éoliennes ont changé le cours des choses en faveur d'un avenir plus radieux, rendant ainsi le développement de leurs différentes technologies essentiel. Notamment au niveau de son générateur où la compétition pour le diagnostic prévisionnel est en train de gagner en importance afin rendre ses machines plus performantes et plus fiables.

Au cours de ce chapitre, il sera question d'une introduction succincte aux turbines éoliennes ainsi qu'aux différents types de générateurs qu'elles emploient, permettant ainsi à cette étude de se pencher davantage sur le fonctionnement et les composants principaux des générateurs asynchrones ainsi que sur leurs défaillances. Dans ce contexte, il convient de voir les différentes approches de diagnostic qui existent afin de mieux appréhender et acquérir les connaissances nécessaires à la suite de cette étude.

### 1.2. Descriptif des énergies éoliennes

L'énergie du vent est l'une des sources d'énergie renouvelable qui va façonner l'avenir : actuellement, elle représente déjà 7,4 % de toute la production d'électricité mondiale en 2023, ce qui rend son développement particulièrement nécessaire et cela permet de mieux justifier les diverses technologies et technique qui apparaissent constamment dans le domaine des turbines éoliennes en général et des différentes composantes plus spécifiquement. [1]

#### 1.2.1. Généralité sur les éoliennes

L'énergie éolienne est une forme d'énergie utilisée depuis des décennies, Sa méthodologie de fonctionnement consiste à exploiter l'énergie du vent afin de générer de l'électricité par le biais des éoliennes, celle-ci captant l'énergie cinétique du vent et la convertissent en une énergie mécanique qui est elle-même ensuite transformée en énergie électrique grâce à une génératrice.

De plus, dans le cadre du développement des énergies renouvelables, les éoliennes représentent un système fiable et non nuisible à l'environnement. Leur

installation peut être réalisée dans le niveau de la terre, mais il devient de plus en plus visible que ces installations sont désormais placées au niveau de la mer, ce qui les rend plus complexes, tout en permettant d'avoir une production énergétique plus fiable. [2]

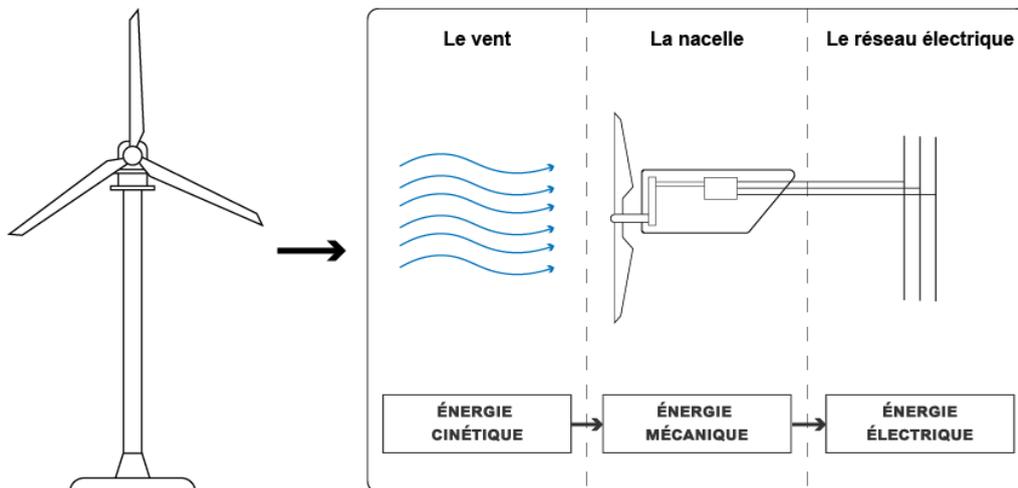


Figure 1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

### 1.2.2. La composition des éoliennes

Les éoliennes varient considérablement en fonction des modèles et de leur composition, mais généralement, les principaux éléments nécessaires à la création de ce type de système sont les mêmes indiqués comme suit :

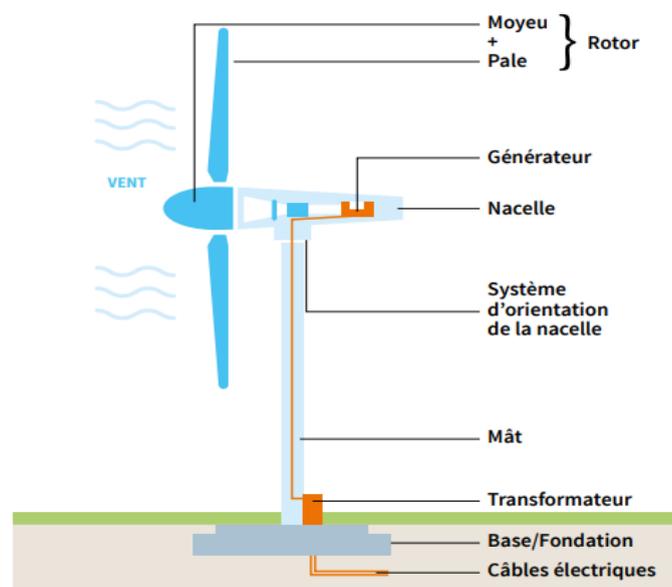


Figure 1.2. Composition d'une éolienne.

### a. Le rotor

Le rôle du rotor est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique tournante la quantité de pales associé au rotor est relativement sans effet par rapport à la performance de l'éolienne, car même si le nombre le nombre de pales est élevé cela ne veut pas dire que le rendement augmente, du fait qu'elle devient de plus en plus lourde ainsi réduisant sa vitesse de rotation.

### b. Le système de transmission

Le système de transmission est constitué d'autres différents éléments rotatifs, notamment de ces éléments il existe la boîte de vitesses qui, due au fait que le rotor de l'éolienne possède une faible vitesse, celle-ci permet d'accélérer sa vitesse de rotation pour pouvoir démarrer le générateur.

### c. La nacelle

La nacelle regroupe tous les éléments du système éolien en relation avec la transformation de l'énergie mécanique vers l'énergie électrique et en plus de ça de multiples actionneurs de commande.

### d. La tour

La tour de l'éolienne est un élément qui sert de support généralement constitué d'un tube d'acier elle doit être assez en hauteur pour échapper à toute perturbation causée par le sol elle est sous forme conique et à l'intérieur se trouvent de nombreux câbles de transport de l'énergie électrique et des équipements de contrôle et de connexion au réseau ainsi qu'un accès à la nacelle.

### e. Les contrôles de l'éolienne

Le système de contrôle des éoliennes horizontales est un système essentiel pour la production d'une énergie électrique propre et utilisable qui comprend les composants suivants:

- Les capteurs

- Les contrôleurs
- Les amplificateurs de puissance
- Les actionneurs

### f. L'équilibre du système électrique

En plus du générateur asynchrone, le système éolien utilise de nombreux autres composants en relation avec ce générateur qui sont des composants électriques pour maintenir l'équilibre durant la production et la distribution de l'énergie électrique à travers le réseau.

### 1.2.3. Les différents types de générateurs au cœur des éoliennes

L'un des facteurs limitants des éoliennes réside dans la technologie de leur générateur. En effet, il n'existe pas de consensus entre les chercheurs et les industriels sur la meilleure technologie de générateur de turbine éolienne. En général, il existe trois principaux types de générateurs d'éoliennes qui sont cités comme tel :

#### a. Générateurs à courant continu

En règle générale, ces générateurs à courant continu sont peu courants dans les applications des éoliennes, à l'exception des cas de faible demande de puissance où la charge est physiquement proche de l'éolienne, ainsi que des applications de chauffage ou de recharge de batteries. [3]

#### b. Générateur synchrone

Les générateurs synchrones sont une technologie éprouvée, car leurs performances en matière de production d'électricité furent étudiées et largement acceptées pendant longtemps. Cependant, ils sont généralement plus complexes, plus coûteux et plus susceptibles de tomber en panne que les générateurs asynchrones.[3]

#### c. Générateurs asynchrones

Alors que la production d'électricité conventionnelle utilise des machines synchrones, les systèmes éoliens modernes utilisent largement les

machines asynchrones dans les applications éoliennes, en raison de leur rendement supérieur et de leur faible prix de production. [3]

### 1.3. Les chaîne de conversion de l'énergie éolienne

La chaîne des éoliennes se caractérise par la présence de deux éléments majeurs, la génératrice et le convertisseur de puissance, ce qui permet d'envisager de nombreuses combinaisons et conceptions différentes. et qui peuvent être classifiées selon trois grandes catégories : [4]

- Les turbines à vitesse fixe sans interface d'électronique de puissance.
- Les turbines à vitesse variable avec convertisseur de puissance à capacité réduite.
- Les turbines à vitesse variable avec convertisseur de puissance à pleine capacité.

#### 1.3.1. Système à vitesse fixe - machine asynchrone à cage

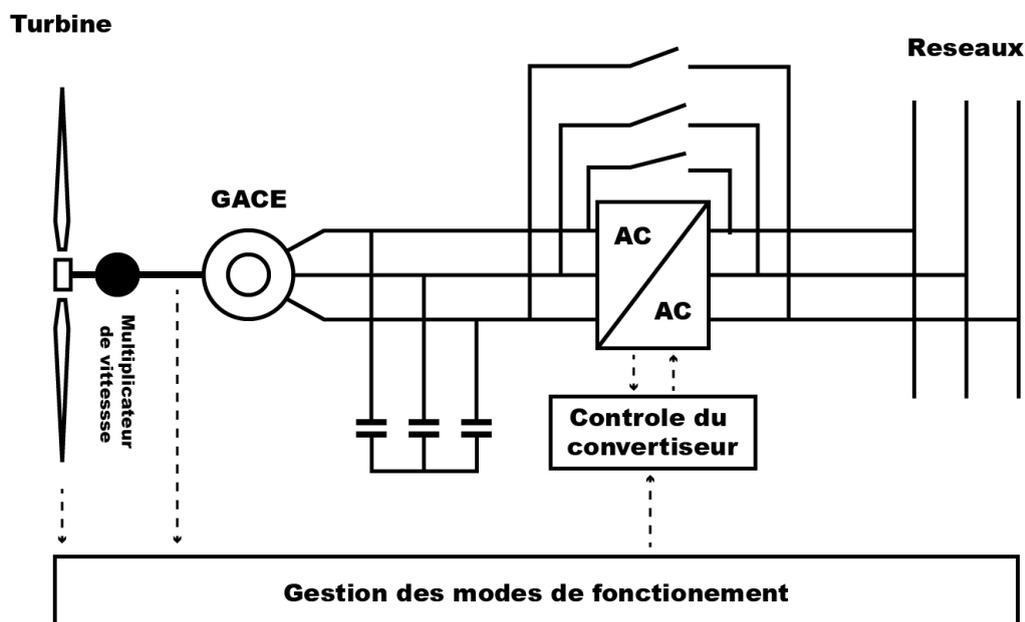


Figure 1.3. Schéma de principe d'un entraînement à vitesse fixe.

La GACE est connue pour sa technologie simple et sa robustesse qui la rend très économique néanmoins sa vitesse étant fixe, sa puissance n'est pas optimisée. rendant ainsi le coût de maintenance essentiellement imputé au multiplicateur est

élevé de plus que l'énergie réactive ne peut être contrôlée. Par ailleurs, la connexion directe de l'enroulement statorique de la génératrice au réseau entraîne une très forte sensibilité lors de la présence de défaut sur celui-ci. [4]

### 1.3.2. Système à vitesse fixe - Machine synchrone à aimants permanents

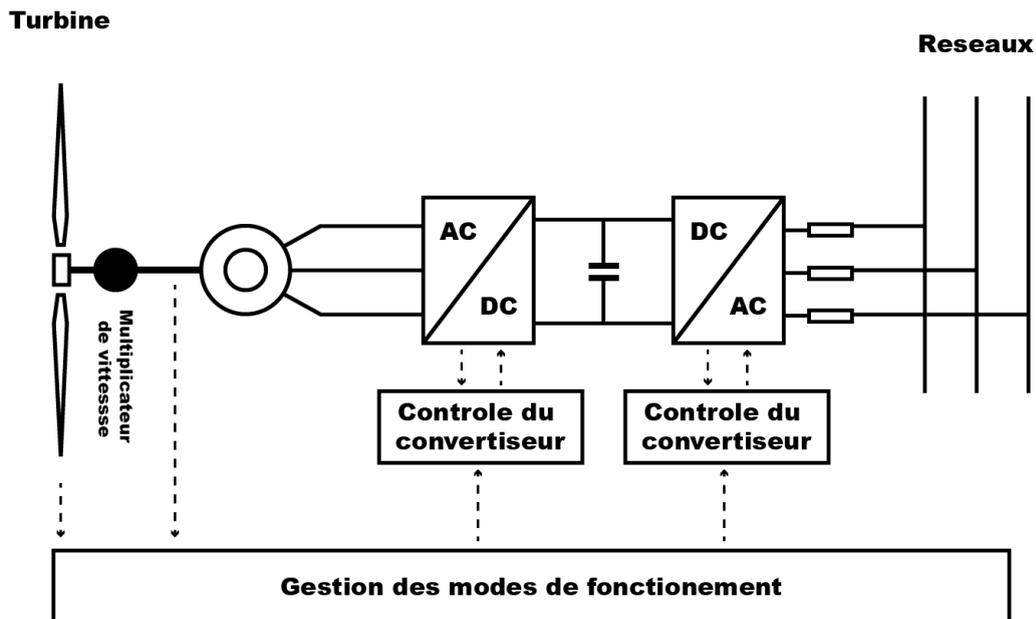


Figure 1.6. Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable - machine synchrone à aimants permanents MSAP.

Le convertisseur qui est connecté au stator de la machine permet de réguler le couple et la vitesse de rotation de celle-ci. D'autre part, le convertisseur relié au réseau assure le transfert de puissance entre la génératrice et le réseau, ainsi que l'échange de puissance réactive avec ce dernier. Grâce à cette interface, il y a une quasi-indépendance entre le réseau et la génératrice : un problème sur le réseau n'affectera pas le fonctionnement de la génératrice. [6]

### 1.3.3. Système à vitesse variable - Machine asynchrone à rotor bobiné

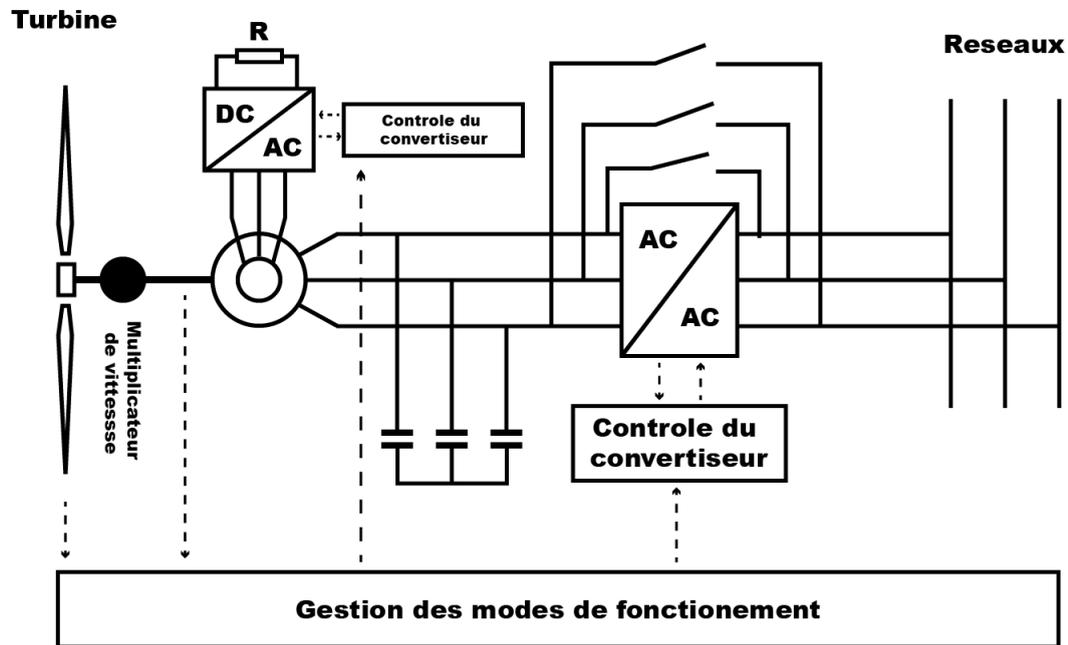


Figure 1.4. Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable - machine asynchrone à résistance rotorique variable MASRe.

Dans cette configuration, le rotor de la machine asynchrone n'est pas court-circuité. Il est équipé d'un enroulement rotorique triphasé et bobiné. Une résistance "contrôlée" est présente sur le rotor de la machine grâce à une interface d'électronique de puissance. Le contrôle de cette interface permet de réguler la résistance rotorique de manière variable. Cela permet d'ajuster la vitesse de la machine de 10% à 16% au-dessus de la vitesse de synchronisme, ce qui augmente considérablement la capture d'énergie et réduit l'impact des fluctuations de puissance dues au vent. [5]

### 1.3.4. Système à vitesse variable - Machine asynchrone à double alimentation

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone dont le rotor (bobiné) est raccordé au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance.

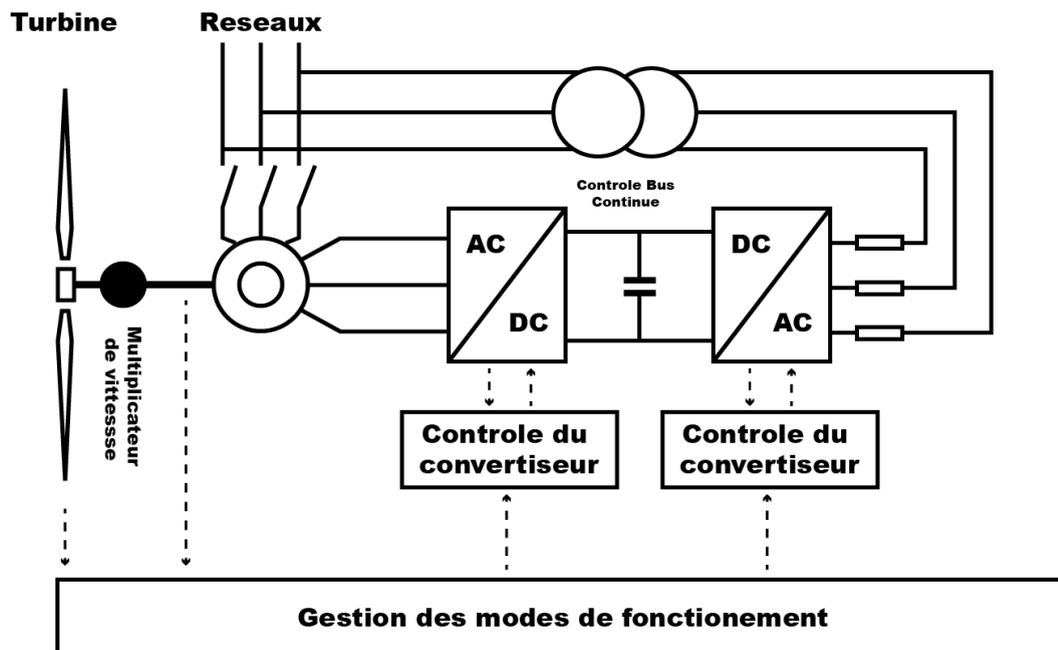


Figure 1.5. Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable - machine asynchrone à double alimentation MADA.

La machine asynchrone à double alimentation "MADA" avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits en-dessus. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur. [5]

### 1.4. Classification des machines électriques

Les générateurs sont l'une des parties les plus essentielles de l'éolienne est celle où cette étude vas se baser. Ils sont généralement classés en fonction du type de réseau auquel ils sont connectés, donc soit en courant alternatif, soit en courant continu. Les plus utilisées d'entre elles sont les machines à courant alternatif, qui elles-mêmes sont divisées en deux catégories différent : les machines synchrones et les machines asynchrones.

La différence fondamentale entre les machines asynchrones et les machines synchrones réside dans la vitesse rotorique. De part ou les machines asynchrones, font preuve d'une vitesse rotorique qui ne correspond pas à la vitesse du champ magnétique créé par la tension de l'alimentation, de plus, d'un point de vue de construction il existe deux catégories de machines asynchrones : les machines à cage d'écureuil et les machines à rotor bobiné, cette distinction peut être observée comme indiqué dans le schéma de la Figure 1.7.[7]

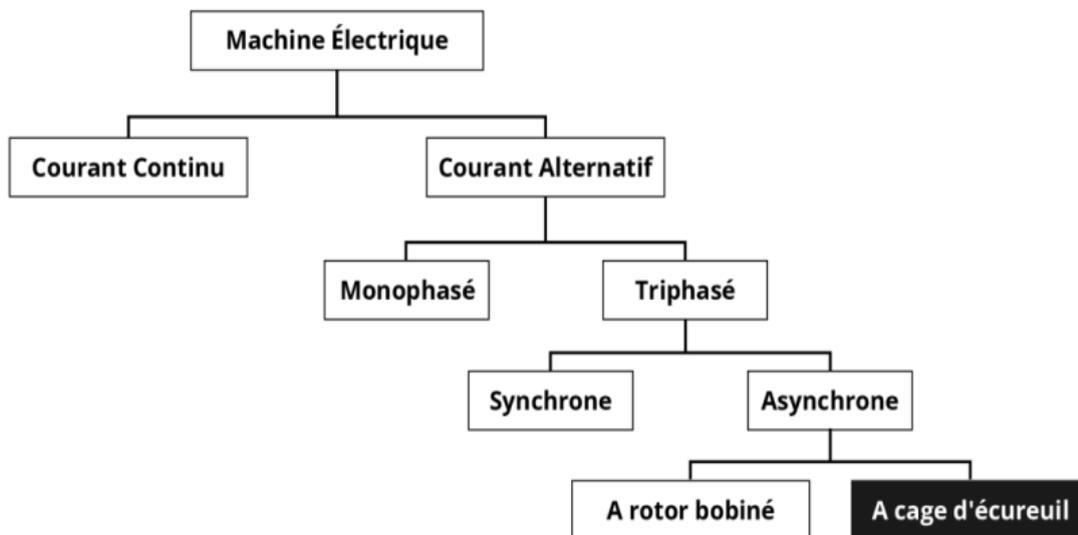


Figure 1.7. Classification des machines électriques.

### 1.5. Étude et fonctionnement des machines asynchrone

Contrairement aux autres méthodes traditionnelles de production d'énergie électrique, la génératrice asynchrone occupe actuellement une large place dans les installations d'éoliennes du monde entier due à sa fiabilité et coûts de production.

La machine asynchrone est composée de deux parties bien distinctes, à savoir le rotor et le stator. Contrairement à la machine synchrone et à la machine à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont reliés au réseau et ainsi elles déterminent l'état magnétique de l'entrefer. De ce fait, la machine asynchrone effectivement n'a pas d'enroulement d'excitation, ni d'aimant permanent. [8]

### **1.5.1. Élément fondamental à la composition d'une machine asynchrone**

La machine asynchrone est généralement constituée de quatre parties bien distinctes et diffèrent l'une des autres qui se situe comme suit :

#### **a. Le stator**

Cette partie représente la partie immobile de la machine et celle qui est connectée à l'alimentation, elle est structurée et formée d'une carcasse en fonte ou en alliage léger qui renferme une couronne de fines tôles en acier au silicium. Ces tôles sont isolées les unes des autres soit par oxydation, et donc par un vernis isolant. Des encoches sont présentes au niveau des tôles pour accueillir tous les enroulements statoriques qui sont responsables de la production du champ tournant. Et chaque enroulement statorique est constitué de plusieurs bobines.

#### **b. Le rotor**

Celle-ci représente la partie tournant de la machine, elle est constituée fondamentalement d'un empilage de fines tôles, isolées entre elles, formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur, tout comme le circuit magnétique du stator. Les conducteurs du rotor sont en court-circuit entre eux et ne sont pas reliés à une source d'alimentation électrique. Et de cela le rotor aura une vitesse inférieure à celle du champ tournant.

Selon la construction du rotor, deux différents modèles de la machine asynchrone sont distingués : les machine à cage, dont le rotor forme une cage d'écureuil et les machine à bague, dont le rotor est bobiné.

#### **c. L'entrefer**

Cette partie représente l'espace vide qui se situe entre le stator et le rotor, l'entrefer est une zone amagnétique et aussi la plus fine de toute la machine ce qui la rend plus sensible aux variations de taille causées par les encoches statoriques et ceci peut engendrer des harmoniques, afin de réduire

cet effet les encoches statoriques sont fermées à l'aide de cales magnétiques qui maintiennent l'enroulement en place.

### d. Les organes mécaniques

Les organes mécaniques de la machine asynchrone sont nombreux dont la carcasse qui sert de support et joue le rôle d'enveloppe pour protéger celle-ci contre les effets de l'environnement extérieur. De plus de la carcasse il y a l'arbre qui est un organe de transmission qui comprend une partie centrale servant de support au corps du rotor, de même c'est nettement remarquable qu'il est soutenu par un ou plusieurs paliers.

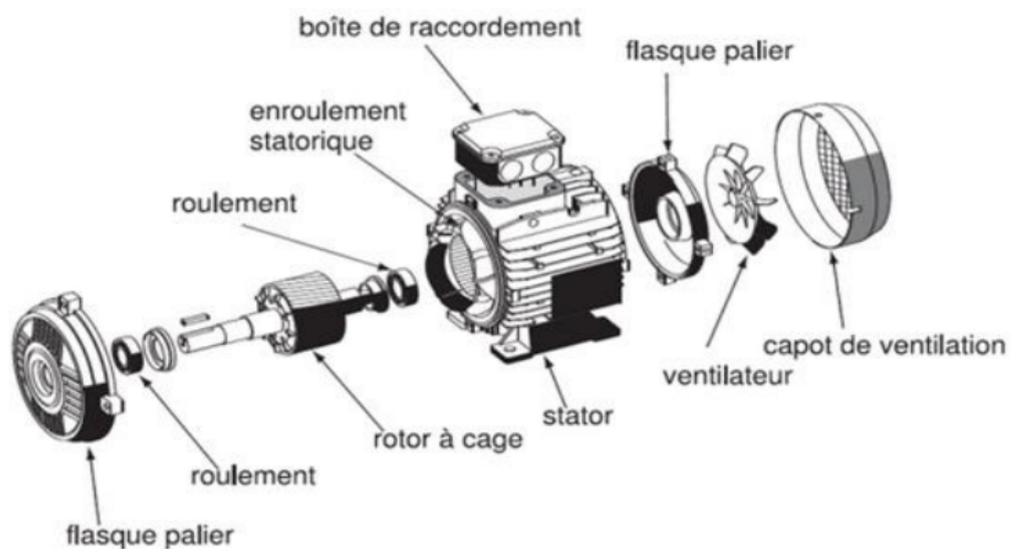


Figure 1.8. Vue éclatée d'un moteur asynchrone électrique.

Ces paliers soutiennent le rotor et lui permettent une rotation assez libre. Le second palier est conçu pour permettre les dilatations thermiques de l'arbre. Aussi au niveau de l'isolation électrique d'un des paliers qui en suit permettra l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique.

### 1.5.2. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

Les machines asynchrones en vue de leur popularité dans plusieurs domaines présentent de nombreux avantages et aussi quelques inconvénients, dont les principaux sont habituellement résumés comme ci-dessous : [9]

### a. Les avantages :

- La structure des machines asynchrones est considérée comme étant relativement simple au niveau de leur fabrication.
- Elles sont très faciles à produire en grande quantité et sont assez robustes.
- Du fait de leur simplicité, le coût de production reste nettement inférieur à celui des autres machines.
- L'absence de système de balais la rend moins sujette à la surchauffe qui est due aux contacts mécaniques et ainsi réduit le taux de sa défaillance.

### b. Les inconvénients :

- Le découplage de la machine asynchrone ne se réalise pas de façon naturelle.
- La machine asynchrone n'est pas une machine linéaire et donc son étude et fonctionnement est un peu plus complexe.
- De plus, la machine asynchrone est connue pour sa grande consommation d'énergie réactive, qui doit être compensée par des batteries de condensateurs.

## 1.6. Les différentes méthodes utilisées de la modélisation des générateurs asynchrones

Le principe bute fondamental de la modélisation d'un générateur asynchrone consiste à pouvoir mettre au point des simulations capables de contribuer à la reproduction du fonctionnement de ces générateurs, et cela peut être réalisé à travers diverses techniques et technologies. Et donc, en quelque sorte, certains de ces modèles figurent ci-dessous.

### 1.6.1. Modélisation de la machine dans le plan triphasé “abc”

Modéliser la génératrice asynchrone sur le plan de référence en abc revient à mettre en place une représentation des trois bobines statoriques ayant leurs axes décalés de 120 degrés. Idem du côté des bobines rotoriques, ces bobines sont alimentées par des courants triphasés et par convention, elles sont alimentées par un système de tensions triphasées sinusoïdal direct. [10]

### 1.6.2. Modélisation de Park biphasé

Par ailleurs, la représentation du modèle de Park pour la génératrice asynchrone est basée sur une représentation biphasée, ce qui signifie qu'il s'agit d'une projection des phases "abc" de la machine sur un repère biphasé orthogonal dénommé "dq0", dans lequel les axes q et d sont en quadrature et l'axe 0 est un axe supplémentaire perpendiculaire au plan "dq".

Pour réaliser ce modèle de Park, il convient d'utiliser la matrice de transformation [P] de Park. En plus de cela, la machine est supposée électriquement et magnétiquement équilibrée. [11]

### 1.6.3. Modélisation à base des méthode numérique “ Élément finie ”

Grâce au développement des technologies numériques de computation, le procédé des éléments finis a pu être mis en œuvre. Ce procédé consiste à permettre de déterminer une solution approchée sur un domaine spatial, c'est-à-dire qui permet de calculer un champ qui correspond à certaines équations et à certaines conditions imposées. La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles, et à rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément .

Cependant, le gros inconvénient de cette méthode est que le MEF a besoin de beaucoup de temps et de ressources pour pouvoir calculer la quantité considérable de données. [12]

## **1.7. Les différents défauts des machines asynchrones à cage**

Même si la machine asynchrone est connue pour sa robustesse et sa fiabilité, cela ne l'empêche pas de connaître des défaillances comme n'importe quelle autre machine. Ces défaillances peuvent être de différentes origines, soit des défauts électriques, mécaniques ou magnétiques, et de causes diverses et variées ; elles sont généralement regroupées et classées en trois catégories pour des raisons de simplification et identification. [13]

- **Les éléments déclencheurs de défauts :**

Ces éléments déclencheurs peuvent être dus à la surchauffe du moteur ainsi qu'aux usures de ces composants mécaniques comme le roulement à billes qui peuvent causer une rupture de fixations et des problèmes d'isolation électrique, ainsi que des surtensions transitoires.

- **Les contributeurs aux défauts :**

L'un des contributeurs au défaut peut être attribué à la surcharge qui se produit assez fréquemment ou à la température ambiante élevée de plus à la défaillance de la ventilation, ainsi qu'à l'humidité et aux fortes vibrations.

- **Les défauts sous-jacents et erreurs humaines :**

Ce sont les défauts qui peuvent être causés par les problèmes de fabrication, ou de composants défectueux, ainsi qu'une protection inadaptée et absence de maintenance.

Ces défaillances proviennent de différentes origines, c'est pourquoi elles sont classées en fonction de leur aspect soit mécanique, soit électrique. Une étude a été réalisée afin de déterminer les endroits où ces défaillances se manifestent le plus souvent et le résultat de celui-ci est présenté tel que l'on peut le voir dans le diagramme de la Figure 1.9.

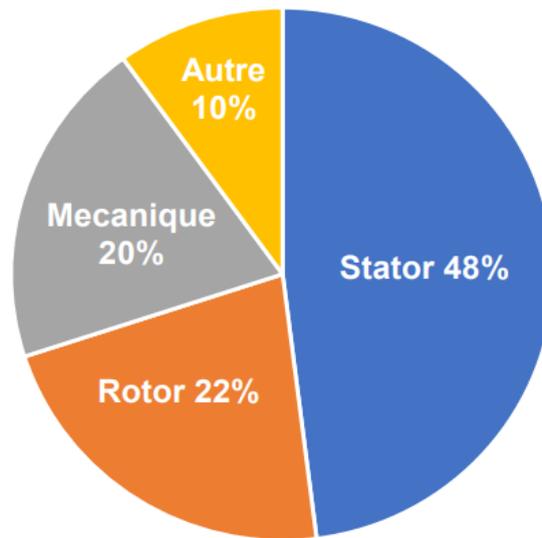


Figure 1.9. distribution des défauts des machines électriques.

### 1.8. Les défauts statoriques

Le stator est un élément clé de la machine asynchrone, généralement confronté à différentes contraintes électriques plutôt que mécaniques. Son bobinage est la principale source de toute défaillance qui occurrent dans cette partie de la machine ainsi que l'effet de l'usure qui est et partiellement responsable, notamment le vieillissement des matériaux, a un impact considérable sur l'intégrité des fils et de leur isolant. [14]

#### 1.8.1. Les défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements est l'une des principales causes de courts-circuits dans les machines électriques. Ce phénomène est dû aux pertes qui génèrent une augmentation de la température aux niveaux des composants du moteur. De ce fait, les matériaux d'isolation ont des limites de température, de tension et de résistance mécanique, qui ne doivent pas être dépassées. Ainsi, si ces limites sont dépassées, cela provoque une dégradation prématurée des matériaux isolants, et donc ne pouvant plus remplir leur fonction, ce qui peut conduire à la naissance d'un court-circuit au niveau des enroulements statorique concerné.

### 1.8.2. Les défauts de court-circuit entre spires statoriques

Le défaut de court-circuit entre spires peut survenir soit au niveau des têtes de bobines, ou sinon dans les différentes encoches de la machine électrique. Ce type de défaut est aussi principalement causé par la dégradation des isolants, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives dans l'enroulement concerné.

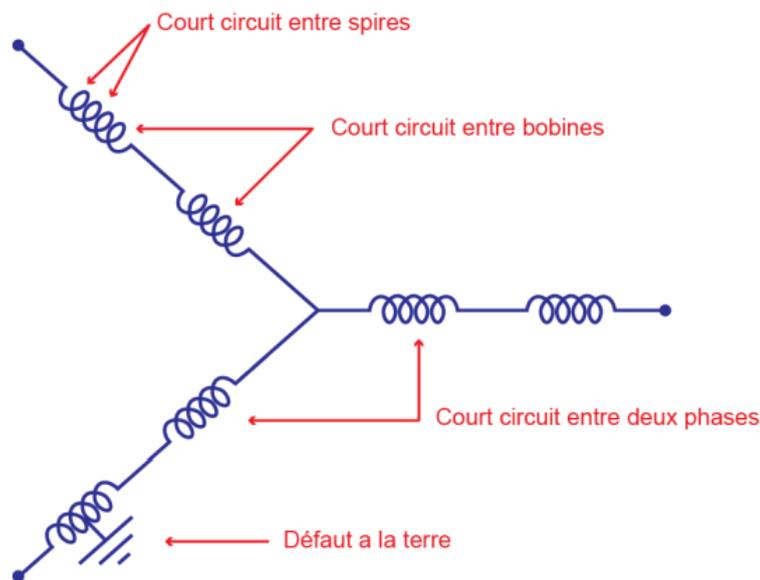


Figure 1.10. Les différents défauts du court-circuit statorique.

Ce court-circuit entre spire statorique provoque une élévation de la température dans l'enroulement affecté, ainsi qu'une augmentation de l'intensité des courants statoriques dans la phase touchée et une légère variation d'amplitude sur les autres phases. Il modifie également le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique.

### 1.8.3. Les défauts de court-circuit dans une phase

Pour un court-circuit dans une phase d'une machine électrique a comme conséquence la perte totale de la phase concernée, ce qui peut entraîner l'arrêt complet de la machine si l'alimentation est maintenue. En plus de ça, les spires en court-circuit engendrent un couple résistant, causé par les courants induits par le flux d'excitation circulant dans les mutuelles de la machine pendant son fonctionnement.

Il est donc important de caractériser cette valeur pour prévoir les effets du défaut sur le fonctionnement de la machine après la défaillance.

### **1.8.4. Les défauts de circuit ouvert sur une phase**

Un circuit ouvert dans une phase d'une machine électrique est moins grave qu'un court-circuit. En effet, l'ouverture d'une phase ne permet pas la circulation de courant de défaut, ce qui élimine le risque d'échauffement qui pourrait endommager le reste de la machine.

De plus, un circuit ouvert ne génère pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Et donc la seule conséquence d'un circuit ouvert reste dans la perte de la phase correspondante et donc la réduction au niveau de la production de couple.

### **1.8.5. Les défauts de court-circuit entre phases**

Les courts-circuits peuvent survenir à divers endroits du bobinage, mais ils sont généralement toujours observés au niveau des têtes de bobine où les conducteurs de différentes phases se côtoient. L'impact de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de son emplacement. Si le court-circuit est situé à proximité de l'alimentation entre les phases, cela peut induire des courants de défaut très élevés qui peuvent provoquer la fusion des conducteurs d'alimentation concernée, ce qui entraînant à un arrêt brutal de la machine. En revanche, si le court-circuit est situé près du point neutre entre deux phases, il peut engendrer un déséquilibre des courants de phase avec un risque moins conséquent de fusion des conducteurs.

### **1.8.6. Les défauts de tension entre phases déséquilibrées**

Le défaut de déséquilibre entre les tensions et les courants de la machine asynchrone peut provoquer une augmentation très excessive de la température du bobinage. Car pour chaque déséquilibre de tension d'environ 3,5% par phase, la température de l'enroulement augmentera de 25% dans la phase qui présente le courant le plus élevé. En conséquence, ces augmentations de température peuvent mener à l'endommagement de l'isolation électrique, réduisant la durée de vie du

système. Il est donc essentiel de maintenir une alimentation triphasée équilibrée pour éviter ces problèmes.

### 1.9. Les défauts rotoriques

Le rotor fait aussi partie des éléments clés d'une machine asynchrone, et il est principalement soumis à des contraintes mécaniques plutôt qu'à des contraintes électriques. Les défauts rotoriques sont les principaux problèmes que l'on rencontre dans cette partie de la machine électrique. Ses défauts peuvent provenir de l'usure des roulements, des déséquilibres du rotor, de la corrosion ou de la rupture des barres du rotor. Les effets de ces défauts peuvent être désastreux bien pire que les défauts statoriques vu qu'ils rendent le fonctionnement de la machine inutilisable, ainsi entraînant des vibrations excessives, avec des pertes de rendement et même une panne complète de la machine. [15]

#### 1.9.1. Rupture de barres

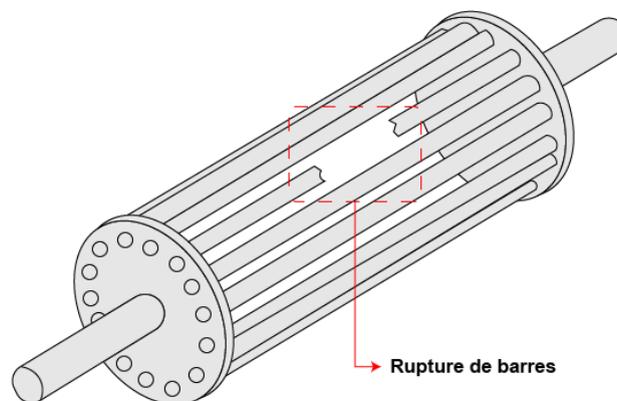


Figure 1.11. Défaut d'une barre cassée.

La rupture de barres est l'un des défauts les plus courants au niveau du rotor, ces défauts pouvant survenir soit au niveau de l'encoche, soit à l'extrémité qui relie la barre à l'anneau rotorique. Cette dégradation des barres entraîne une réduction de la valeur moyenne du couple électromagnétique nominal et une augmentation de l'amplitude des oscillations, qui à leur tour provoquent des fluctuations dans la vitesse de rotation de la machine. Ces différentes vibrations mécaniques peuvent

entraîner un fonctionnement assez anormal de la machine, générant ainsi d'autres défauts mécaniques supplémentaires.

### 1.9.2. Rupture d'anneau de court-circuit

La rupture d'une portion d'anneau est aussi l'un des défauts courants du rotor, qui peuvent être causés par deux causes soit des bulles de coulée ou bien des dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

La rupture d'une portion d'anneau perturbe la répartition des courants dans les barres rotoriques, entraînant ainsi une modulation d'amplitude des courants statoriques, similaire à celle provoquée par la cassure de barres. Ces défauts affectent le couple électromagnétique qui a pour moyen d'augmenter les oscillations dans la machine, ce qui peut générer des vibrations mécaniques et un fonctionnement plutôt anormal de la machine.

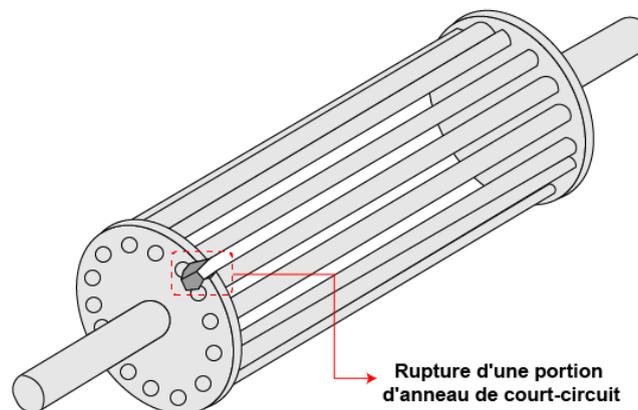


Figure 1.12. Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

### 1.9.3. Excentricité statique et dynamique

Lors du fonctionnement d'une machine électrique, il peut arriver que le rotor soit décentré, ce qui provoque des oscillations de couple et un décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor. Ce phénomène est appelé l'excentricité et il peut avoir plusieurs différentes origines, telles qu'un mauvais positionnement des paliers lors de l'assemblage, ou bien une usure des roulements, une surcharge ou encore un défaut de fabrication.

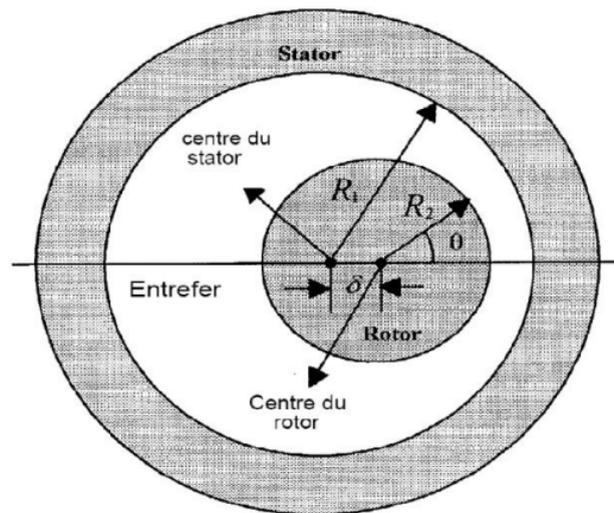


Figure 1.13. Différents types de la dissymétrie de l'entrefer.

Ces problèmes peuvent entraîner une variation de l'entrefer dans le moteur vu que le rotor ne sera plus aligné, tout cela mène à une répartition non homogène des courants dans le rotor, ainsi qu'un déséquilibre des courants statoriques. Ces effets peuvent causer des vibrations mécaniques et une performance assez anormale de la machine.

### 1.9.4. Court-circuit dans les enroulements rotoriques

La cage rotorique d'une machine électrique est constituée de barres et d'anneaux de court-circuit en aluminium ou en cuivre. Toutefois, la rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique.

Les causes de l'apparition de ce type de défaut peuvent être multiples. En effet, la rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être due à plusieurs phénomènes indépendants les uns des autres. Ces phénomènes peuvent inclure des contraintes mécaniques excessives, des défauts de fabrication ou des problèmes de qualité des matériaux.

## 1.10. Défaillance d'ordre mécanique

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone due à leur construction

assez non fiable. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur.[16]

### 1.11. Les différentes méthodes de diagnostic

Comme constaté auparavant, les machines asynchrones sont soumises pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier à ces échecs qui surviennent, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut [17][18]

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories :

- **les techniques mécaniques :**

À travers elle, il est possible de trouver deux techniques, l'une consistant à mesurer la température où les différentes températures de la machine sont constamment en surveillance et ainsi permettre de savoir lorsqu'il y a contradiction sur ces lectures.

Par ailleurs, il existe une forme de diagnostic fondée sur les vibrations générées par la machine, étant donné que celle-ci émet des bruits. Par conséquent, cette analyse peut représenter une source de renseignements sur son état. [19]

- **les techniques chimiques :**

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seules les machines en service sont

échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes pour permettre de mieux étudier les défauts.

[18]

- **les techniques magnétiques et électriques :**

Pour les techniques magnétiques caractérisées principalement par leur axial de fuite lors d'un défaut dans lequel ces flux sont détectés à l'aide d'une bobine enroulée autour de l'arbre de la machine. Et aussi par n'importe quel arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de l'arbre de la machine ou par d'autres dispositifs sensibles tels que les sondes à effet hall.

Pour les techniques de courant, cette méthode est de loin la meilleure puisqu'elle n'utilise aucune autre capture et ne coûte pas très cher, la seule condition requise étant de capturer l'évolution du courant. Cette méthode de surveillance consiste donc à utiliser le spectre du courant statorique. [19]

### **1.11.1. Technique de traitement de signal utilisé pour la diagnostique des défaut**

Les données disponibles contiennent les informations pertinentes pour le diagnostic, ce sont les caractéristiques des signaux fournies par les capteurs. Les méthodes de diagnostic basées sur le traitement du signal associent des signatures spécifiques au fonctionnement sain ou défaillant du système surveillé, après l'analyse des signaux. La précision de cette analyse est cruciale pour prendre une décision éclairée suite au diagnostic. Pour extraire les caractéristiques d'un signal lié à un défaut, il est courant d'extraire l'amplitude ou les densités d'amplitude. Cependant, d'autres possibilités existent, telles que la détermination des transformées de Fourier, des fonctions d'autocorrélation ou des densités spectrales.

Parmi les approches existantes, les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'un défaut. Il faut également citer les méthodes temps-fréquence qui peuvent être,

dans certaine configuration, plus riches que l'analyse spectrale, citons comme exemple FFT et les ondelettes. [20]

### 1.12. Conclusion

En conclusion, le présent chapitre aborde une variété de sujets différents reliés entre eux d'une manière ou d'une autre, comme le démontre ce chapitre qui débute par une brève présentation de l'énergie éolienne et des turbines éoliennes pour se pencher par la suite davantage sur le type de machine utilisé, plus particulièrement la machine asynchrone et ses défaillances, mais aussi sur les méthodes de détection et de diagnostic de défaut.

La compréhension de ces éléments et idées principaux est essentielle pour la modélisation de la machine asynchrone, qui sera le sujet clé du prochain chapitre. Ou il sera présenté les différentes méthodes de modélisation de la génératrice asynchrone dans son état sain, et cela, pour mieux comprendre et analyser son fonctionnement et pour pouvoir après passer à une étude détaillée des défauts éventuels.

**Chapitre 2:**  
**Modélisation de la génératrice**  
**asynchrone à l'état sain**

### 2.1. Introduction

Étant donné la haute demande et l'utilisation de la machine asynchrone dans les systèmes éolienne, du fait qu'elle soit le meilleur choix en termes de qualité ou de robustesse, il est indispensable de bien comprendre son fonctionnement au niveau physique et mathématique afin de pouvoir concevoir des modèles capables de la représenter de manière précise en vue de faciliter sa mise en oeuvre.

Ce type de machine est connu pour sa consommation d'énergie réactive afin de pouvoir magnétiser son rotor, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau. Cela est leur principal inconvénient, la solution à ce problème est assez simple vue qu'elle consiste à ajouter des batteries de condensateurs. Malgré tout, ce système à vitesse fixe n'exploite pas toute la puissance disponible du mouvement du vent dans une application éolienne.

Afin d'améliorer le rendement de ce système, certains constructeurs utilisent la machine asynchrone à cage à fréquence variable. Cependant, cette solution est coûteuse du fait qu'elle exige la présence d'un multiplicateur de vitesse et d'un variateur de fréquence.

### 2.2. La génératrice asynchrone à cage

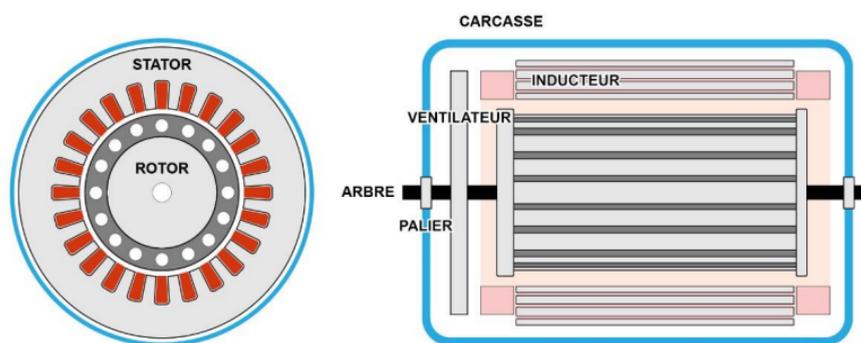


Figure 2.1. Coupe d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil.

La génératrice asynchrone à cage triphasée est un système électromécanique qui est couplé à l'aide d'un circuit magnétique. Son stator se compose la plupart du temps de trois enroulements statoriques séparés les uns des autres, tandis que son rotor a une structure complètement différente qui se caractérise par ses barres

conductrices court-circuitées entre elles à l'aide d'un anneau conducteur à chaque bout, de ce fait sa ressemblance avec une cage d'écureuil lui vaut le nom de rotor à cage d'écureuil.

Toute machine asynchrone peut être utilisée comme générateur. Pour ce faire, il suffit que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme exprimée par l'équation suivante :

$$\Omega_s = \frac{60f}{p} \quad (2.1)$$

En tenant compte de:

$f$  : est la fréquence du champ tournant

$p$  : est le nombre de paires de pôles

De cette façon, le rotor parvient à produire son propre champ magnétique. Aussitôt que ce générateur est connecté au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique du stator.

Il est observé que si la vitesse de rotation du rotor est égale à celle du champ magnétique, aucune induction est créée au niveau du rotor, En conséquence, aucune interaction n'est présente au sein du champ magnétique statorique.

Finalement, lorsque la vitesse du rotor dépasse légèrement celle du champ magnétique aux niveaux statorique, une force électromagnétique similaire à celle que l'on obtient avec un générateur synchrone se développe.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ magnétique statorique est appelée le glissement et en pratique sa valeur ne dépasse jamais quelques pourcents. [25]

Ce glissement  $g$  de la machine est définie par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (2.2)$$

avec son évolution représenté dans le graph ci dessous :

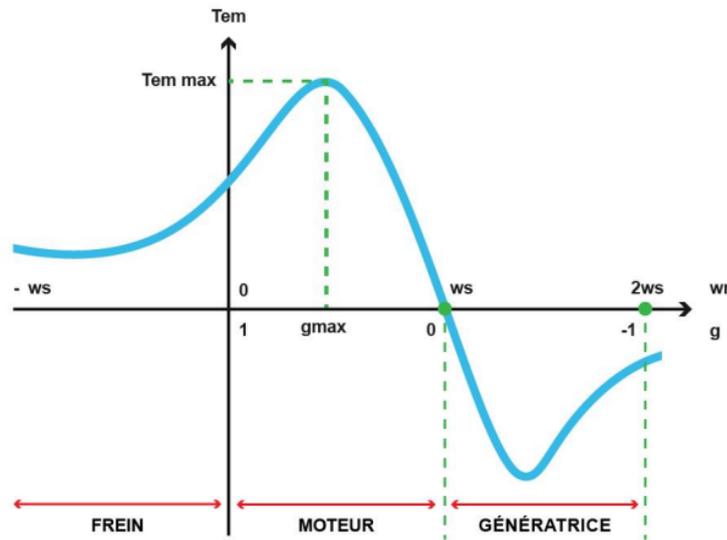


Figure 2.2. Glissement d'une génératrice asynchrone.

### 2.3. Modèle "abc" de la génératrice à cage

Le générateur asynchrone à cage est formé de trois enroulements logés dans les encoches du stator et de la cage conductrice du rotor. Quelle que soit la technique employée, le rotor est toujours comparable à trois enroulements identiques, parfaitement symétriques et court-circuités.

On a dans la figure 2.3 une représentation symbolique de la machine asynchrone où les enroulements statoriques sont déphasés d'une valeur égale à  $\frac{2\pi}{3}$  dans l'espace de même la cage rotorique peut être modélisée, elle aussi, par trois enroulements déphasés d'une valeur égale à  $\frac{2\pi}{3}$ .

Cette représentation simplificatrice de la machine asynchrone à cage ne donne pas la possibilité de déterminer les courants réels qui circulent dans chacune de ces barres, toutefois elle permet de traduire assez précisément les influences des barres rotoriques dans le fonctionnement de la génératrice asynchrone. [22]

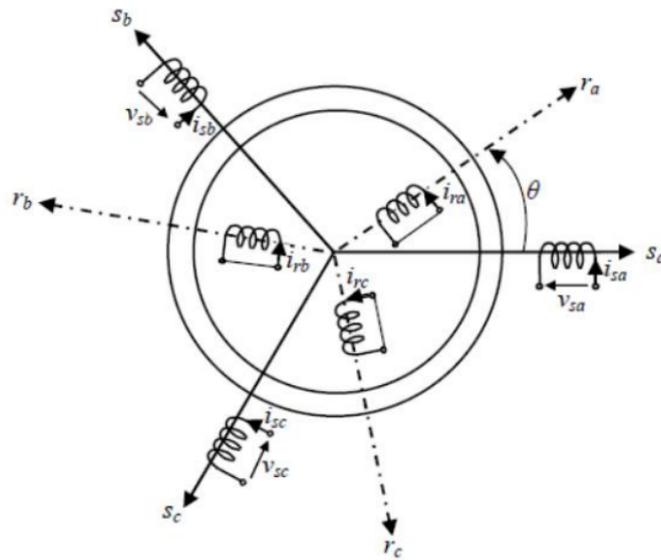


Figure 2.3. Disposition des enroulements de la machine asynchrone triphasée.

### 2.3.1. Equations des tensions de la génératrice

#### a. Au niveau statorique

Par application des principes de la loi de Faraday, il est possible d'obtenir l'équation de la tension statorique, laquelle peut être formulée de la manière suivante: [22]

$$v = - Ri - \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.3)$$

Tout en prenant en compte les hypothèses simplificatrices mentionnées précédemment, il est ainsi possible d'exprimer le modèle des tensions statorique de cette machine comme suit :

$$\begin{cases} v_{as} = - R_s i_{as} - \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ v_{bs} = - R_s i_{bs} - \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = - R_s i_{cs} - \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (2.4)$$

Et il est également possible de voir leur forme matricielle sous :

$$[v_s] = [R_s][i_s] - \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (2.5)$$

Avec les éléments qui suivent :

- La matrice des flux statoriques s'exprime par :  $\varphi_s = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^T$
- La matrice des courant statoriques s'exprime par :  $i_s = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T$
- La matrice des tensions statoriques s'exprime par :  $v_s = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T$
- La matrice des résistance statoriques :  $R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$

À travers la précédente formule, le résultat obtenu peut être résumé comme suit :

$$\frac{d[\varphi_s]}{dt} = [R_s][i_s] + [v_s] \quad (2.6)$$

Il existe par ailleurs les équations du flux statorique et des inductances propres et mutuelles étant exprimées sous la forme de :

$$[\varphi_s] = - [L_{ss}][i_s] - [L_{sr}][i_r] \quad (2.7)$$

Avec la matrice d'inductances statorique exprimé comme suit :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_m + L_{ls} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_m + L_{ls} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_m + L_{ls} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Avec les notions suivant :

- $L_{ms}$  : inductance de magnétisation du stator.
- $L_{ls}$  : inductance de fuite du stator.

Il convient de noter que la relation entre l'inductance de magnétisation statorique et l'inductance de magnétisation générale est illustrée dans l'équation 2.9 :

$$L_{ms} = \frac{2}{3}L_m \quad (2.9)$$

Avec la prise en compte de l'excitation du condensateur, les résultats obtenus sont :

$$[i_{sd}] = [i_c] + [i_l] \quad (2.10)$$

$$[i_c] = c \frac{d[v_n]}{dt} \quad (2.11)$$

Et pour une charge résistive la matrice est :

$$[i_l] = [R_l]^{-1}[V_n] \quad (2.12)$$

Avec la résistance de charge qui est égale à :

$$[R_l] = \begin{bmatrix} rl & 0 & 0 \\ 0 & rl & 0 \\ 0 & 0 & rl \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Au final, cela donne l'équation suivante :

$$\frac{d[v_n]}{dt} = \frac{1}{c} ([i_s] - [R_l]^{-1}[v_n]) \quad (2.14)$$

on peut voir le schéma représentatif des condensateurs comme suit :

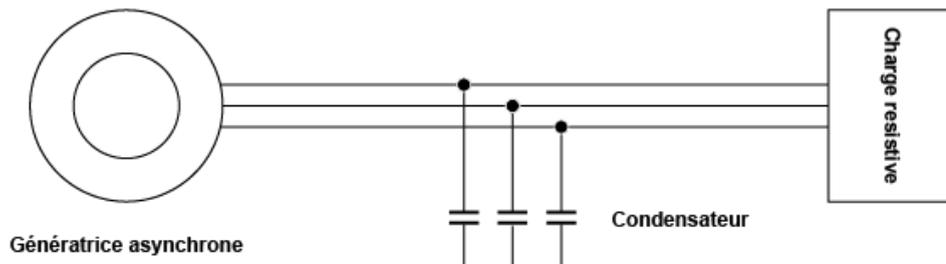


Figure 2.4. Distribution des condensateurs pour une génératrice asynchrone.

Et de cela on a finalement les éléments qui suivent :

- La matrice des tensions de phase par rapport au point neutre est représenté comme suit :  $v_n = [v_{an} \ v_{bn} \ v_{cn}]^T$
- La matrice des courant des lignes est :  $i_s = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T$
- La matrice des courant des capacités est :  $i_c = [i_{ac} \ i_{bc} \ i_{cc}]^T$
- La matrice des courant de la charge est :  $i_l = [i_{al} \ i_{bl} \ l]^T$

### b. Au niveau rotorique

De la même manière que l'équation de tension statorique de la machine, les équations de tension rotorique sont formulée de la manière suivante :

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ 0 = R_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ 0 = R_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (2.15)$$

Et sont représentés sous leur forme matricielle suivante :

$$0 = [R_r][i_r] - \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (2.16)$$

Avec les détaille suivant :

- La matrice des flux rotoriques est décrite de telqu :  $\varphi_r = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^T$
- La matrice des courant rotoriques est décrite de telqu :  $i_r = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$
- La matrice des résistance rotoriques est :  $R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$

À partir de la dernière équation, permet d'aboutir à ce qui suit :

$$\frac{d[\varphi_r]}{dt} = [R_r][i_r] \quad (2.17)$$

Il existe par ailleurs les équations du flux rotorique et des inductances propres et mutuelles étant exprimées sous la forme de :

$$[\varphi_r] = -[L_{rs}][i_s] - [L_{rr}][i_r] \quad (2.18)$$

avec :  $L_{rs} = [L_{sr}]^T$

Les matrices d'inductance mutuelles statorique et rotorique sont calculés comme suite :

$$[L_{sr}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Pour la matrice équivalente des inductances rotoriques il convient :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_m + L_{lr} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_m + L_{lr} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_m + L_{lr} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

### 2.3.2. Détermination des courants de la génératrice

Pour déterminer les courants du stator, il est pratique de calculer un vecteur de deux composantes indépendantes  $i_{as}$  et  $i_{bs}$  sous forme de matrice, à savoir :

$$[i_s] = [B_s][i_{abs}] \quad (2.21)$$

Avec les matrices  $B_s$  et  $i_{abs}$  défini comme suit:

$$[B_s] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}; [i_{abs}] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix}$$

Pour le flux statorique, il est défini grâce à un vecteur de flux à deux composantes indépendantes comme suit :

$$[\varphi_{abs}] = [A_s][\varphi_s] \quad (2.22)$$

Cela peut se vérifier avec la relation suivante :

$$[\varphi_{abs}] = -[L_{sd}][i_{abs}] - [L_{srd}][i_r] \quad (2.23)$$

$$[\varphi_r] = -[L_{rsd}][i_{abs}] - [L_{rr}][i_r] \quad (2.24)$$

Avec les matrices suivantes :

$$[A_s] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[L_{sd}] = [A_s][L_{ss}][B_{sd}]$$

$$[L_{srd}] = [A_s][L_{sr}]$$

$$[L_{rsd}] = [B_s][L_{rs}]$$

À l'aide des dernières équations, il est possible de constater que les équations finale des courant statorique est rotique est exprimé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} [i_{abs}] &= - \left( [L_{sd}] - [L_{srd}][L_{rr}]^{-1}[L_{rsd}] \right)^{-1} \left( [\varphi_{abs}][L_{srd}][L_{rr}]^{-1}[\varphi_r] \right) \\ [i_r] &= - \left( [L_{rr}] - [L_{rsd}][L_{sd}]^{-1}[L_{srd}] \right)^{-1} \left( [\varphi_r] - [L_{rsd}][L_{sd}]^{-1}[\varphi_{abs}] \right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

### 2.3.3. Model d'état dans le repère "abc" de la GACE

Afin de pouvoir modéliser et représenter le générateur asynchrone à cage dans le repère "abc", toutes les équations ci-dessus sont combinées dans un seul

modèle d'état qui peut décrire le plus précisément le fonctionnement de cette génératrice asynchrone est qui est indiqué dans les group d'équation 2.26 :

$$\begin{cases} \frac{d[\varphi_s]}{dt} = -[R_s][B_s]([L_{sd}] - [L_{srd}][L_{rr}]^{-1}[L_{rsd}])^{-1}([\varphi_{abs}] - [L_{srd}][L_{rr}]^{-1}[\varphi_r]) + [v_n] \\ \frac{d[\varphi_r]}{dt} = -[R_r]([L_{rr}] - [L_{rsd}][L_{sd}]^{-1}[L_{srd}])([\varphi_r] - [L_{rsd}][L_{sd}]^{-1}[\varphi_{abs}]) \\ \frac{d[v_n]}{dt} = \frac{1}{C}([T][B_s][C_s]([\varphi_{abs}] - [L_{srd}][L_{rr}]^{-1}[\varphi_r]) - [R_l]^{-1}[v_n]) \\ j \frac{d\Omega}{dt} = T_m \cdot T_e - f v \Omega \end{cases} \quad (2.26)$$

Avec l'équation de la vitesse mécanique et le couple électromagnétique qui s'exprimé comme suit :

$$T_e = \frac{P}{2} [i_s]^T \frac{\partial [L_{sr}]}{\partial \theta} [i_r] \quad (2.27)$$

## 2.4. Modèle de Park de la génératrice à cage

La génératrice asynchrone à cage est une machine fortement couplée, sa représentation réelle dans le système triphasé est alors relativement très complexe et pour atteindre l'objectif de cette étude, de nombreuses méthodes de modélisation sont abordées et envisagées telles que le modèle diphasé (d,q).[23]

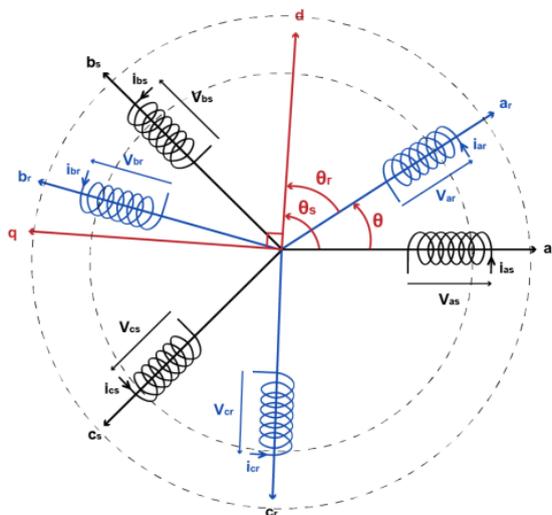


Figure 2.5. Représentation de la machine asynchrone dans le repère diphasé.

Par atteindre l'objectif de simplification et dans le but de conservation de la précision cela rend nécessaire l'appel à l'utilisation du modèle biphasé (d,q) qui remplit tous ces critères il est donc donné par la transformation de Park.

Ainsi donc le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

$$[X_{dq}] = [p(\theta_s)][X_{abcs}]$$

Au moment de choisir un repère (d,q) diphasé, l'axe d peut être repéré par :

$\theta_s$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase «  $S_a$  » du stator

$\theta_r$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase «  $R_a$  » du rotor

À chaque instant du fonctionnement de la génératrice asynchrone, ces deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s = - \theta_r$$

### 2.4.1. Choix du référentiel (d,q)

Pour exprimer l'équation de la machine dans le repère (d,q), il existe de nombreuses possibilités vis-à-vis du choix de l'orientation du repère et cela dépend des différents objectif visé par cette l'application [24]

#### a. Repère lié au stator

Ce référentiel est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation. Les conditions sont telles que :

$$\omega_a = 0 \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = - \omega_m$$

#### b. Repère lié au rotor

Ce référentiel est intéressant dans les problèmes des régimes transitoires lorsque la vitesse de rotation est considérée comme constante. Il se traduit par la relation :

$$\omega_r = \omega_m \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = 0$$

### c. Repère lié au champ tournant

C'est le seul référentiel qui n'introduit pas de simplification dans les équations de la machine, il est utilisé lorsque la fréquence d'alimentation des moteurs asynchrones doit être constante et à fréquence variable lors des petites perturbations autour d'un régime donné, il est caractérisé par les relations :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \omega_a \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = \omega_s - \omega_m$$

### 2.4.2. Les équations électriques du modèle de Park

Les grandeurs (courant, tension et flux) du système diphasé s'expriment en fonction des grandeurs triphasées est donc ils sont comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = p(\theta_s) \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Avec les matrices suivantes :

$$\begin{cases} [v_{dqs}] = [p(\theta_s)] [v_{abcs}] \\ [v_{dqr}] = [p(\theta_r)] [v_{abcr}] \end{cases} \quad \begin{cases} [i_{dqs}] = [p(\theta_s)] [i_{abcs}] \\ [i_{dqr}] = [p(\theta_r)] [i_{abcr}] \end{cases} \quad \begin{cases} [\varphi_{dqs}] = [p(\theta_s)] [\varphi_{abcs}] \\ [\varphi_{dqr}] = [p(\theta_r)] [\varphi_{abcr}] \end{cases}$$

Par ailleurs  $[p(\theta_s)]$  et  $[p(\theta_s)]^{-1}$  s'exprime par :

$$[p(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Et aussi son inverse de la manière suivante :

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Ainsi, avec l'application de la transformation de Park à l'équation statorique, le résultat obtenu est le système d'équation suivant :

$$[p(\theta_s)]^{-1}[v_{dqs}] = [R_s][i_{dqs}][p(\theta_s)]^{-1} + \frac{d}{dt}[p(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dqs}] \quad (2.31)$$

À partir de ces données, les équations de Park du stator et du rotor sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - \omega_a \cdot \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} - \omega_a \cdot \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad \begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \cdot \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = 0 \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} - (\omega_a - \omega_m) \cdot \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2.32)$$

$\omega_a$  Est la vitesse angulaire électrique du repère (d, q) telle que :  $\omega_r = \omega_a - \omega_m$

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de Park, en fonction des grandeurs, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & l_m \\ l_m & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & l_m \\ l_m & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère (d, q) par rapport aux repères triphasés prenant en compte le repère lié au rotor de la machine, de cela en partant des équations précédent et avec l'utilisant des relations qui lie les flux aux

courants, l'équation matricielle suivante sont obtenus et ils englobent les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère (d. q) donc de ce fait :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & -l_s \cdot \omega_m & 0 & -l_m \cdot \omega_m \\ l_s \cdot \omega_m & R_s & l_m \cdot \omega_m & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Finalement la dernière expression est la suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{l_s l_r - l_m^2} \begin{bmatrix} l_s & 0 & l_m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & l_m \\ l_m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & l_m & 0 & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} - R_s \cdot i_{ds} + \omega_m \cdot l_s \cdot i_{qs} + \omega_m \cdot l_m \cdot i_{ds} \\ v_{qs} - R_s \cdot i_{qs} + \omega_m \cdot l_s \cdot i_{ds} + \omega_m \cdot l_m \cdot i_{dr} \\ -R_r \cdot i_{dr} \\ -R_r \cdot i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

### 2.4.3. Equation d'auto excitation de la machine

Les différentes formules d'auto-excitation de la génératrice asynchrone à cage d'écurie sont en réalité les formules électriques qui régissent le comportement des condensateurs tenant compte de : [25]

$$[i_c] = \frac{d[Q_c]}{dt}$$

Avec :

$[i_c]$  courant qui traverse les trois condensateurs

$[Q_c]$  la charge des trois condensateurs

Donc pour le repère de Park :

$$[p(\theta_s)][i_{cp}] = \frac{d[p(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt} \quad (2.36)$$

De cela le développement des relations et présenté dans l'équation 2.37 :

$$[i_{cp}] = [p(\theta_s)]^{-1} \frac{d[p(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt} = [p(\theta_s)]^{-1} \left( \frac{d[p(\theta_s)]}{dt} \right) [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt} \quad (2.37)$$

Sachent que  $[Q_{cp}] = C[V_p]$  :

$$[i_{cp}] = C \cdot \omega_a \begin{bmatrix} 0 \\ -v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix} + C \frac{d[v_{cp}]}{dt} \quad \frac{d[v_{cp}]}{dt} = \frac{[i_{cp}]}{C} - \omega_a \begin{bmatrix} 0 \\ -v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Pour  $\omega_a = \omega_m$  (repère de Park lié au rotor), les équations sont écrite sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C} + \omega_m \cdot v_{cq} \\ \frac{dv_{qc}}{dt} = \frac{i_{qc}}{C} + \omega_m \cdot v_{cd} \end{cases} \quad (2.39)$$

## 2.5. L'effet de saturation dans la GACE

Dans le modèle linéaire de la machine à induction, il est courant de considérer l'inductance de magnétisation comme une valeur constante, mais cela ne correspond pas à la réalité. En effet, il est nécessaire de prendre en compte la saturation du circuit de magnétisation et donc de prendre en compte la variation de l'inductance de magnétisation. [26]

Certes, les valeurs des inductances peuvent présenter des variations significatives en fonction du flux dans les différentes zones internes du générateur. Par conséquent, il serait plus approprié de les envisager de manière alternative en utilisant un système d'équations différentielles comprenant des paramètres non

linéaires qui décrivent les modes de saturation. Il est nécessaire de modéliser la courbe de magnétisation. Plusieurs fonctions sont utilisées ; mais il n'existe aucune fonction qui couvre tous les points de la courbe, pour cela la modélisation reste approximative avec un minimum d'erreurs.

On dit que le matériau se sature lorsque sa perméabilité diminue avec le degré d'induction magnétique

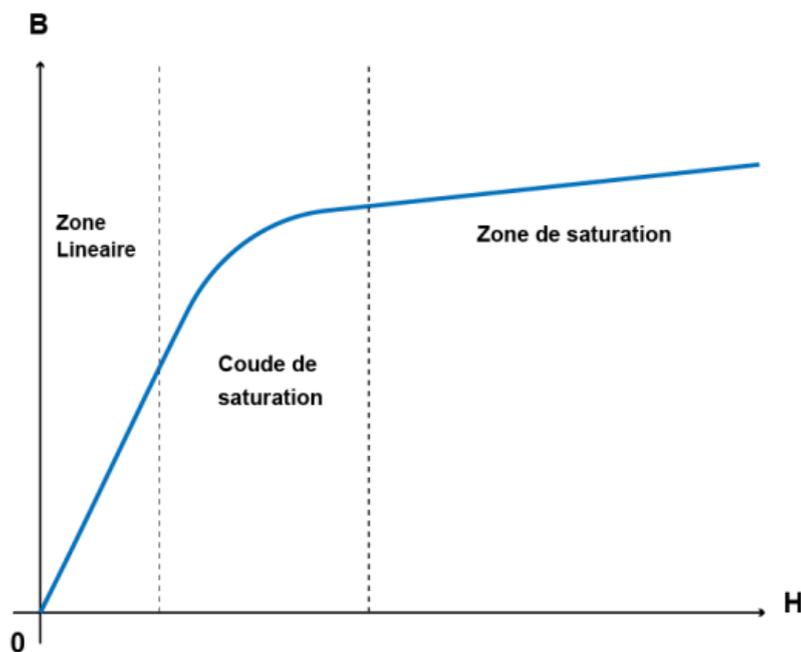


Figure 2.6. Courbe de la première aimantation d'un matériau ferromagnétique.

### 2.5.1. Le phénomène de saturation croisée

En outre l'effet de saturation proprement dit, crée un autre effet appelé, "saturation croisée", qui peut être considéré comme un couplage magnétique entre les enroulements des axes  $d$  et  $q$  de la machine biphasée. Ces deux bobinages sont spécialement en quadrature, ce qui veut dire qu'elles ne devraient avoir aucune interaction mutuelle en régime non saturé.

### 2.5.2. Modèle saturé de la GACE dans le repère de Park

Le système d'équations en tensions est précédemment vu comme suit :[27]

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_a \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_a \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad \begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_a - \omega_m) \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (2.40)$$

Avec les flux suivants :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = l_{\sigma s} i_{ds} + \varphi_{md} \\ \varphi_{qs} = l_{\sigma s} i_{qs} + \varphi_{mq} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_{dr} = l_{\sigma r} i_{dr} + \varphi_{md} \\ \varphi_{qr} = l_{\sigma r} i_{qr} + \varphi_{mq} \end{cases} \quad (2.41)$$

$l_{\sigma s}$  et  $l_{\sigma r}$  : Inductance de fuites statorique et rotorique.

$\varphi_{md}$  et  $\varphi_{mq}$  : vecteur flux magnétiques suivant l'axe (d,q).

Les composantes d'axes d et q du flux et du courant magnétisants :

$$\begin{cases} \varphi_{md} = L_m \cdot i_{md} \\ \varphi_{mq} = L_m \cdot i_{mq} \end{cases} \quad \begin{cases} i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \\ i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \end{cases} \quad (2.42)$$

Donc quand les équations sont développés cela mène vers :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = l_{\sigma s} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{md} \\ \varphi_{qs} = l_{\sigma s} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{mq} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_{dr} = l_{\sigma r} \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{md} \\ \varphi_{qr} = l_{\sigma r} \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{mq} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_{dr} = -l_{\sigma r} \cdot i_{ds} + (l_{\sigma r} + L_m) \cdot i_{md} \\ \varphi_{qr} = -l_{\sigma r} \cdot i_{qs} + (l_{\sigma r} + L_m) \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (2.43)$$

Considérant le courant magnétisant circulant dans la branche magnétisante du modèle de la machine est comme suit :

$$|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (2.43)$$

En remplaçant les quantités de flux trouvées dans le système d'équation et après tout calcul fait, le nouveau système d'équation qui tient compte de la saturation du circuit magnétique de la machine est :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + l_{\sigma s} \frac{di_{ds}}{dt} + l_d \frac{di_{md}}{dt} + l_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} - \omega_a (l_{\sigma s} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{mq}) \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + l_{\sigma s} \frac{di_{qs}}{dt} + l_q \frac{di_{mq}}{dt} + l_{dq} \frac{di_{md}}{dt} - \omega_a (l_{\sigma s} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{md}) \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + l_{\sigma r} \frac{di_{ds}}{dt} + (l_{\sigma r} + l_d) \frac{di_{md}}{dt} + l_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) (l_{\sigma r} \cdot i_{qs} + (l_{\sigma r} + L_m) \cdot i_{mq}) \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + l_{\sigma r} \frac{di_{qs}}{dt} + (l_{\sigma r} + l_q) \frac{di_{mq}}{dt} + l_{dq} \frac{di_{md}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) (l_{\sigma r} \cdot i_{ds} + (l_{\sigma r} + L_m) \cdot i_{md}) \end{cases} \quad (2.44)$$

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant s'écrit :

$$\begin{aligned} C_{em} &= p (\varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \varphi_{qs} \cdot i_{ds}) \\ C_{em} &= p \left( (l_{\sigma s} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{md}) i_{qs} - (l_{\sigma s} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{mq}) \cdot i_{ds} \right) \end{aligned}$$

Finalement Le couple électromagnétique s'exprime donc par :

$$C_{em} = p \cdot L_m (i_{md} \cdot i_{qs} - i_{mq} \cdot i_{ds}) \quad (2.45)$$

$p$  : nombre de paires de pôles.

## 2.6. Simulation et analyse des résultats

Pour mieux comprendre le comportement de la GACE, il a été entrepris une simulation à partir des deux méthodes différentes, l'une basée sur le modèle d'état "abc" et l'autre sur le domaine de Park. Ces simulations ont été effectuées à travers le logiciel Matlab et Simulink. Dans les deux situations, le système le plus approprié pour la suite de cette étude a été retenu.

un aperçu de la conception du système dans le domaine de Park est présenté dans les Figure 2.7 et 2.8 :

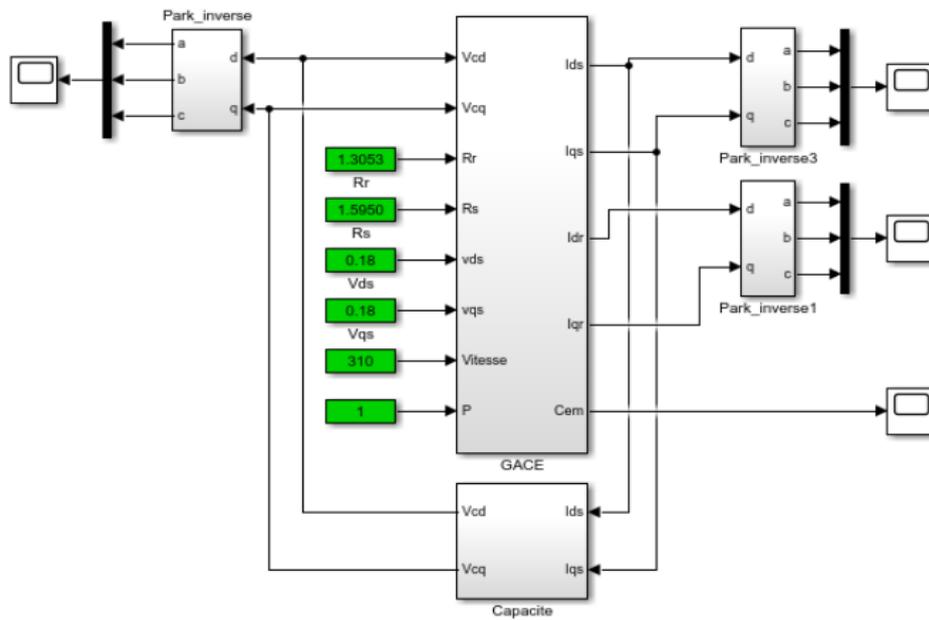


Figure 2.7. Schéma bloc de la génératrice asynchrone.

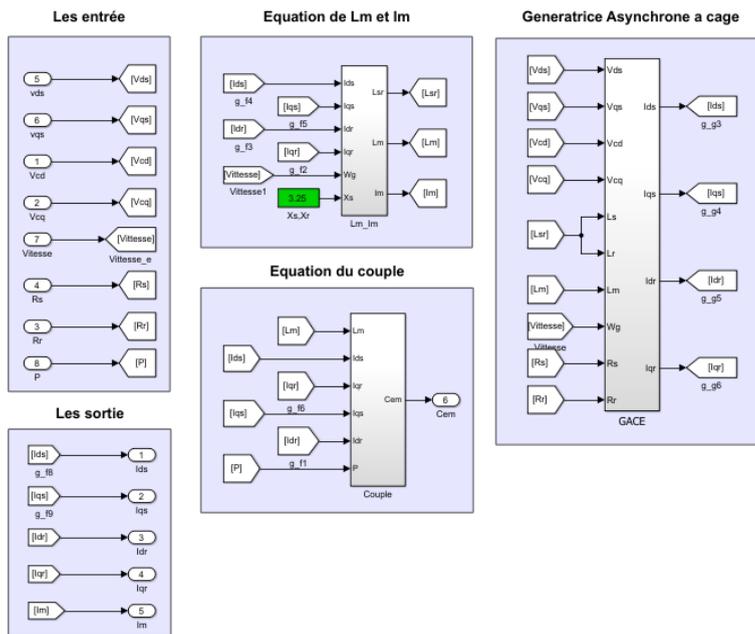


Figure 2.8. Vue détaillée du schéma bloc de la génératrice asynchrone.

## 2.6.1. Simulation en régime linéaire

### a. Simulation

Au cours de ce stade de la simulation, la GACE est abordée dans le cadre d'un fonctionnement linéaire où il est question des évolutions des

signaux courants ainsi que des autres signaux de la machine lorsque l'effet de la saturation n'est pas pris en compte.

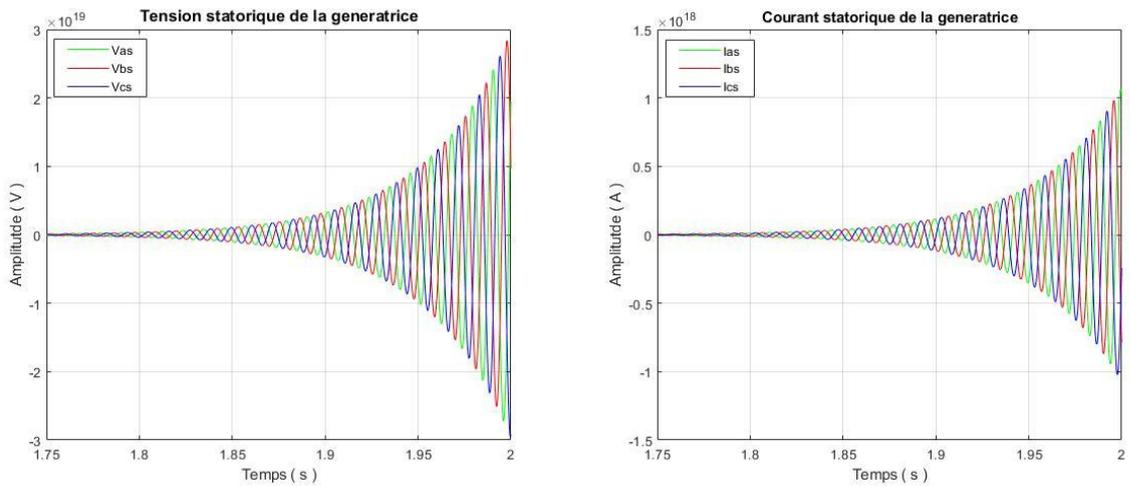


Figure 2.9. Les courants et tension statorique de la génératrice en régime linéaire.

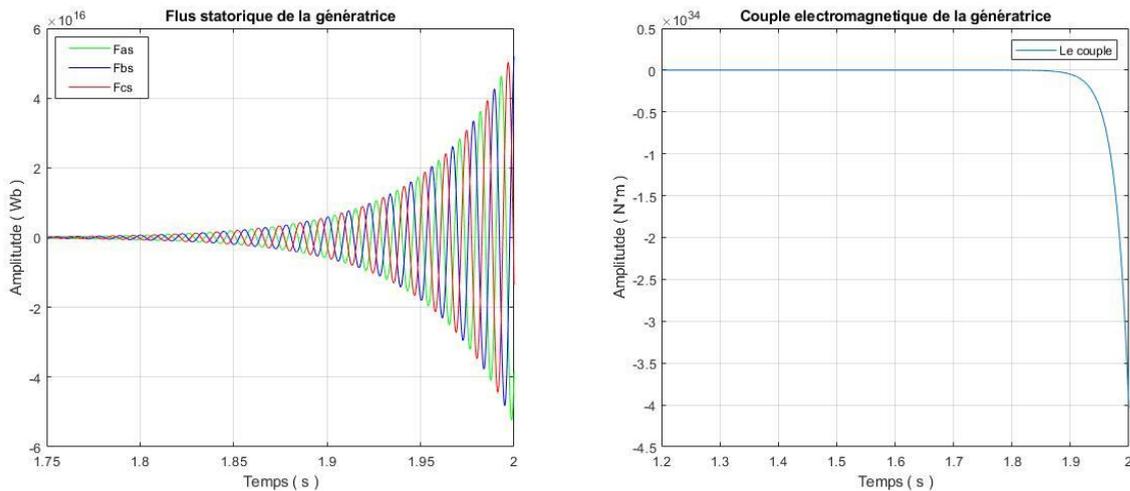


Figure 2.10. Les flux statiques et le couple électromagnétique de la génératrice en régime linéaire.

### b. Analyse des résultat

Au cours de cette simulation, il est possible d'observer un nombre considérable de résultats distincts, notamment les éléments suivants :

- Sur la figure 2.9 la tension induite augmente indéfiniment de façon exponentielle avec l'oscillation et ceci est dû à la supposition de non saturation des circuits magnétiques de la machine.

- La forme du courant est similaire à celle de la tension, cependant il est déphasé par rapport à elle de  $90^\circ$ , ce qui permet au courant d'atteindre rapidement des valeurs critiques.
- On peut constater que le couple diminue car la machine fonctionne en mode générateur, et ses valeurs tendent vers l'infini dû à la linéarité du système.

Il est évident que la croissance non limitée des valeurs de la machine n'est pas conforme à la réalité. Il est donc nécessaire de prendre en compte la saturation du circuit magnétique.

### 2.6.2. Simulation en régime de saturation

#### a. Simulation

Au cours de cette simulation, la saturation est introduite dans ce système, ce qui entraîne les différents signaux suivants :

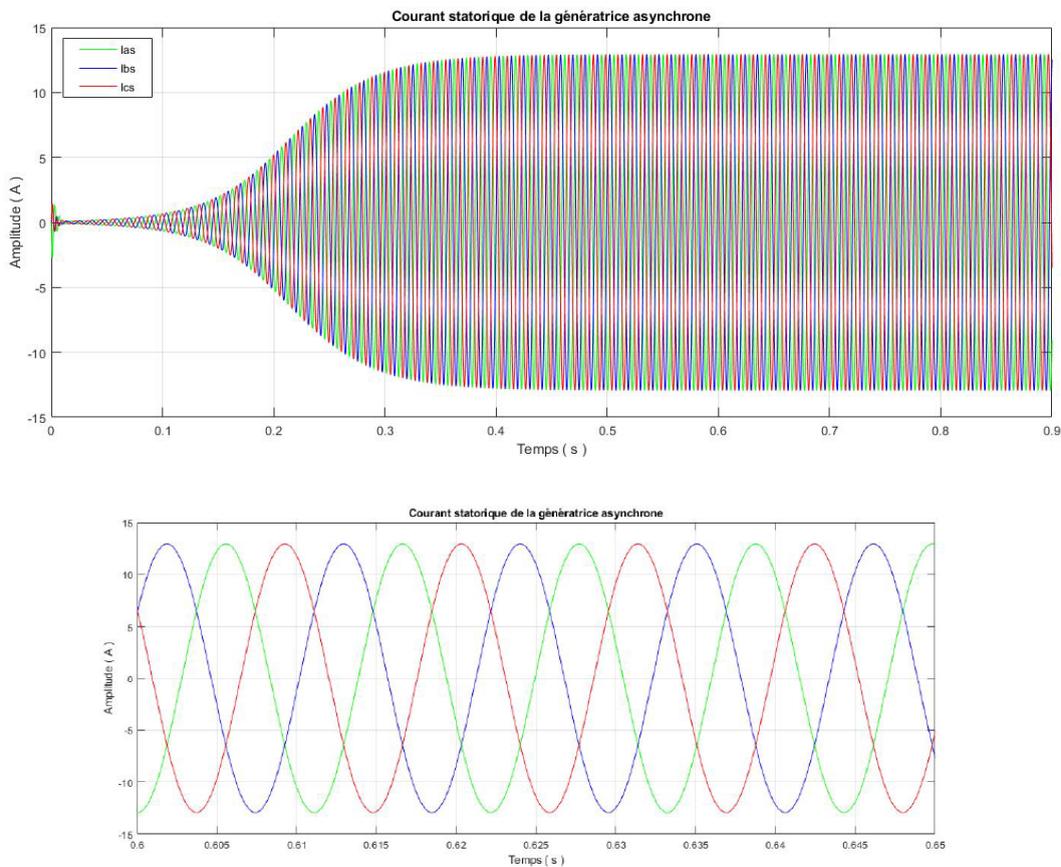


Figure 2.11. Les courants statoriques de la génératrice en régime de saturation.

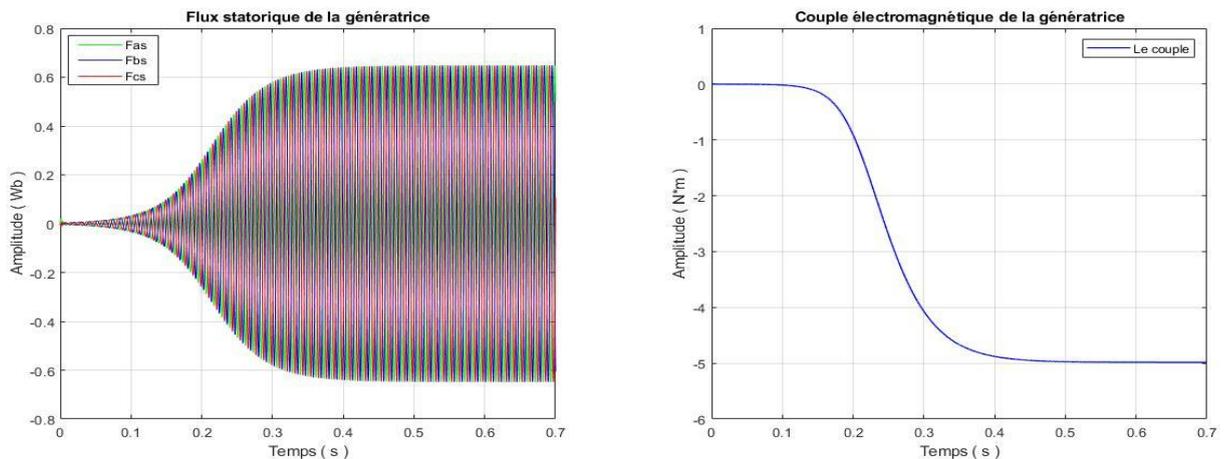


Figure 2.12. Les flux statoriques et le couple électromagnétique de la génératrice en régime de saturation.

### b. Influence de la capacité du condensateur C :

Le but de ces tests est de déterminer l'influence du condensateur sur le fonctionnement de la machine. Plus précisément, c'est de déterminer le changement de tension de la machine à travers différentes valeurs du condensateur.

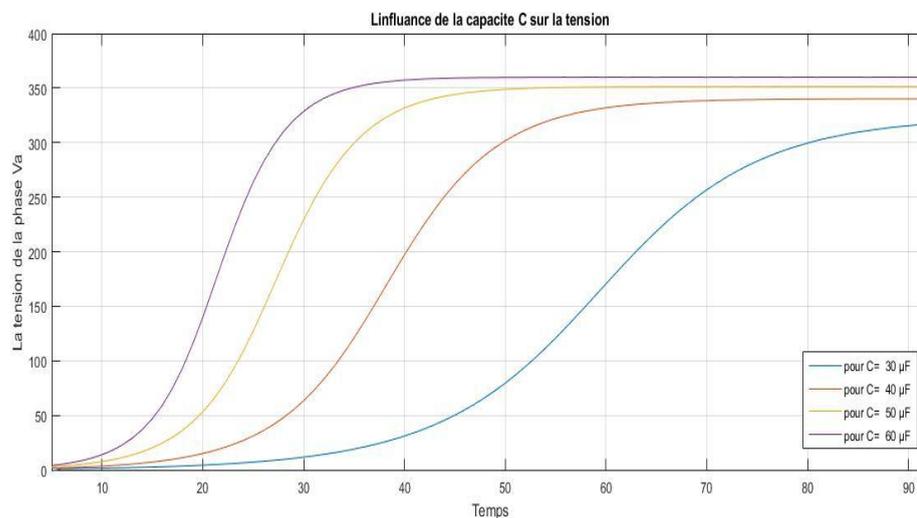


Figure 2.13. influence de la capacité C sur la tension

### c. Analyse des résultat

Au cours de cette simulation, il est possible d'observer un nombre considérable de résultats distincts, notamment les éléments suivants :

- La figure 2.11 représente l'évolution du courant statorique en tenant compte de la saturation où, pendant le démarrage, le courant généré augmente de manière exponentielle avant de se stabiliser à environ 0,35 seconde et ceci est le moment où le courant de magnétisation atteint sa saturation.
- Pour la figure 2.13, après avoir testé différentes capacités, il est évident que la tension est dépendante de celles-ci, que ce soit au niveau de sa valeur ou de son temps de réponse.

Tout cela donne naissance à un signal triphasé qui peut être facilement injecté sur le réseau, ce qui rend ce type de simulation le plus réaliste et fidèle à ce que pourrait donner un véritable générateur asynchrone.

### 2.7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a traité principalement des générateurs asynchrones utilisés dans les éoliennes et de leurs différents types de modélisation en fonction de l'utilisation et des avantages qu'ils offrent. Les résultats ont ainsi été présentés de la simulation à la fois dans un régime linéaire et dans un régime de saturation qui reflète mieux la réalité.

Il est indispensable de bien comprendre le déroulement de ce chapitre, étant donné que le chapitre suivant portera sur la modélisation de la machine à l'état défectueux et où nous approfondirons également un peu plus sur les méthodes de diagnostic.

# **Chapitre 3:**

## **Modélisation de la génératrice asynchrone à l'état défectueux**

### 3.1. Introduction

Le générateur asynchrone à cage d'écureuil, en dépit de sa réputation en termes de fiabilité ainsi que de sa durabilité, présente de temps à autre des défaillances qui peuvent endommager la machine. La compréhension de ces phénomènes est une étape fondamentale du présent projet, qui contribuera à un diagnostic et un traitement plus adéquats de ces défaillances quand elles se manifestent.

Afin de permettre d'analyser correctement les différents cas de défaillances de la génératrice asynchrone, il est indispensable de recourir à diverses techniques d'analyse des signaux, notamment les méthodes de transformation, parmi celles-ci les plus couramment utilisées sont les ondelettes et les transformées de Fourier rapides, lesquelles permettent d'obtenir une meilleure interprétation des signaux ainsi que de leur progression.

### 3.2. La génératrice asynchrone à cage en défaut

Le générateur asynchrone, comme toute autre machine tournante, est soumis à différentes forces électromagnétiques ou mécaniques. Dans des conditions normales, l'interaction entre ces forces conduit au fonctionnement stable de la machine avec le minimum possible de bruit et de vibrations, cependant, les défauts sont toujours inévitables, quelle que soit la robustesse et la fiabilité du système.

En effet, lorsqu'une défaillance apparaît, les équilibres entre les forces qui influent sur le fonctionnement de la machine sont perdus et cela peut entraîner un résultat assez imprévisible qui peuvent conduire au dysfonctionnement total de la machine.

Ces défaillances sont généralement classées en fonction de leur type, soit du type mécanique ou de type électrique, alors que leurs sources peuvent varier considérablement de source interne à des sources externes selon les conditions environnementales, comme l'explique le schéma de la figure 3.1 et 3.2.[28]

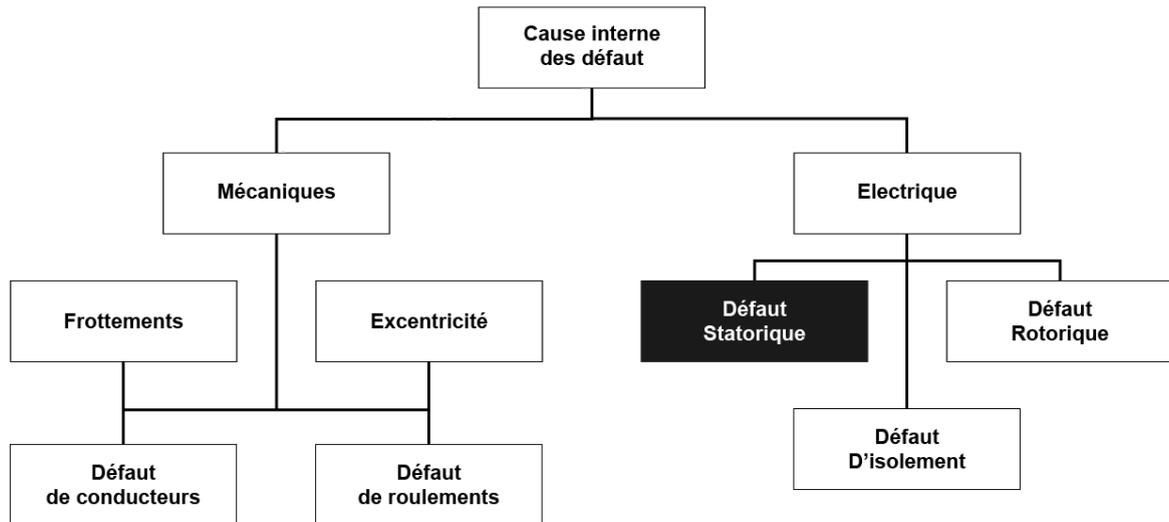


Figure 3.1. Les causes internes des défauts de la génératrice asynchrone à cage.

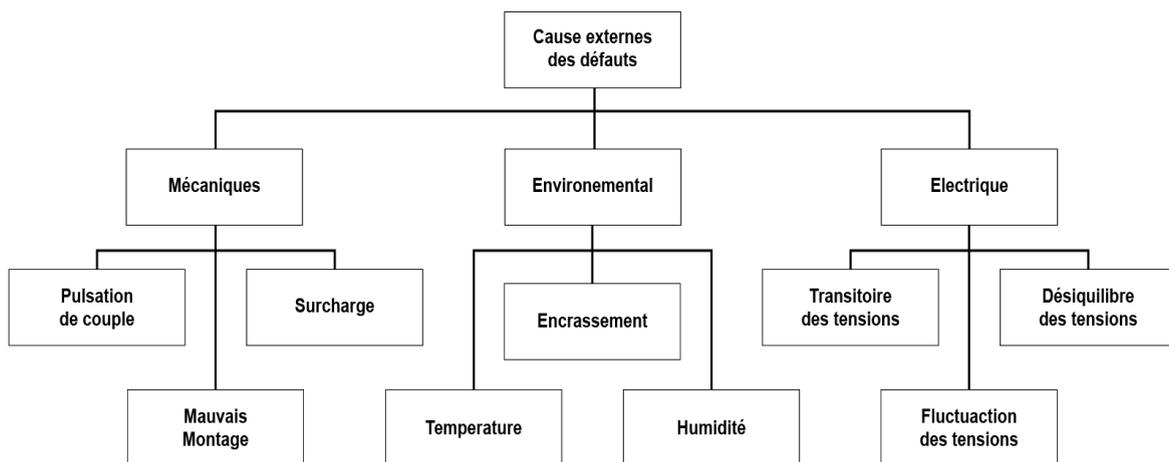


Figure 3.2. Les causes externes des défauts de la génératrice asynchrone à cage.

### 3.3. Les défauts de court-circuit entre spires statoriques

#### 3.3.1. Définition

Comme mentionné auparavant, la défaillance la plus courante est le court-circuit entre les spires du bobinage statorique qui est principalement observé dans les cas où l'isolant se dégrade entre deux spires du même bobinage. Ce défaut peut être modélisé par une résistance reliant deux points de la bobine, dont la valeur de cette résistance dépend de la sévérité du défaut.

Le court-circuit entre les spires statorique peut évoluer pour aboutir à un court-circuit entre spires total. L'évolution de la résistance de défaut vers une très grande valeur conduit à un court-circuit complet peut être très rapide dans la plupart des matériaux isolants.[29]

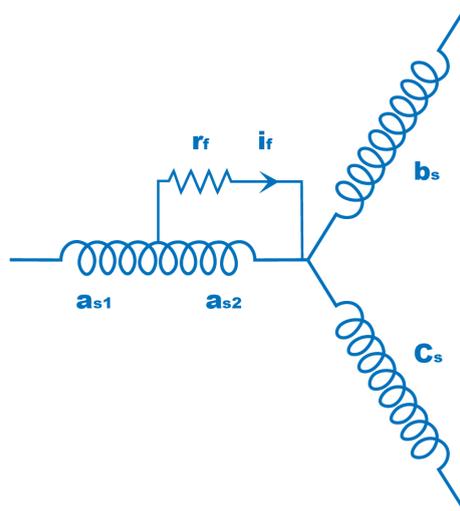


Figure 3.3. Schéma de principe d'un défaut entre spires sur une phase statorique "as".

#### 3.3.2. Influence d'un court-circuit sur les courants de ligne

La faille entre les spires du bobinage statorique du générateur peut provoquer un courant électrique important dans ces spires défectueuses dont l'amplitude deviendra alors importante si cette faille reste inaperçue, elle se propagera jusqu'à devenir de plus en plus importante.

Effectivement le courant dans les spires court-circuitées est beaucoup plus élevé par rapport au courant nominal et cela provoque une augmentation des températures qui engendre la destruction de l'isolant de ce la destruction complète de la machine.

D'une manière plus générale, lors d'un court-circuit, il est constaté qu'il y a des vibrations et des oscillations dans le couple, autrement dit une nouvelle composante dans le couple électromagnétique ainsi que dans le courant statorique. En effet, un court-circuit de spires est à l'origine d'un nouveau bobinage monophasé dans le

stator, qui fournit un courant important tout en créant un champ magnétique supplémentaire.[30]

### 3.4. Modélisation de la GACE en défaut

#### 3.4.1. Mise en équations de la machine

Comme pour la modélisation de la GACE dans son état normal où la défaillance ne se produit pas toujours complètement, il a été prévu qu'une résistance équivalente permettrait de modéliser ce qui reste de la résistance entre les spires court-circuitées, sa valeur peut également indiquer la sévérité de la défaillance. Ainsi le bobinage dans lequel la défaillance apparaît est divisé en deux parties : la zone où le court-circuit est survenu et l'autre zone où il est absent. [31][32]

Il a pris en compte le coefficient (  $\mu$  ) qui décrit le nombre de spires court-circuitées, ce qui donne les caractéristiques démontré dans l'équation 3.1 :

$$N_f = N_{a2} = \mu(N_{as1} + N_{as2}) = \mu N_s \quad (3.1)$$

avec :

$N_s$  : le nombre de spires par phase

$N_f$  : le nombre de spires de la partie du bobinage concernée par le défaut

On a donc de cela:

$$[V_{sabc}] = [V_{sa1} \ V_{sb} \ V_{sc} \ V_{sa2}]^T \quad \text{et} \quad [I_{sabc}] = [I_{sa1} \ I_{sb} \ I_{sc} \ I_{sa2}]^T \quad (3.2)$$

Les différentes inductances et mutuelles des deux circuits sont représenté représentation schématiquement dans la figure 3.4 :

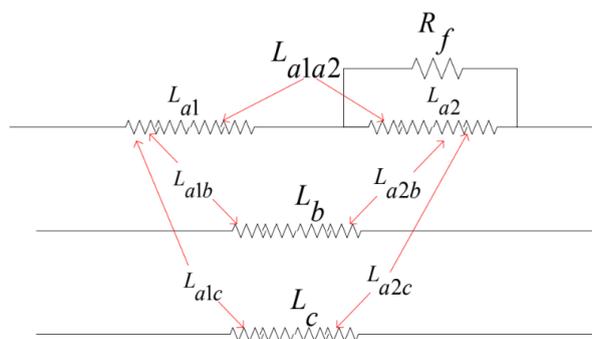


Figure 3.4. Circuit du stator avec une schématisation d'un défaut dans la phase "as".

Ainsi, il convient également de noter que :

$$r_{as1} = (1 - \mu) r_{as} \quad (3.3)$$

$$r_{as2} = \mu \cdot r_{as} \quad (3.4)$$

L'étude des circuits élémentaires de la phase as donné les relations suivantes:

$$V_{as} = V_{as1} + V_{as2} \text{ et } 0 = V_{as} - r_f \cdot I_f \quad (3.5)$$

$$I_{as1} = I_{as} \text{ et } I_{as2} = I_{as} - I_f \quad (3.6)$$

Les inductances propres et mutuelles inductances de la machine en défaut de court-circuit déterminées par des expressions très simples prennent uniquement en compte le pourcentage du nombre de spires en court-circuit ( $\mu$  en %). Par exemple, les inductances des sous bobines résultant d'un court-circuit entre spires d'une phase sont déterminées par les expressions suivantes à partir des paramètres de la machine saine:

$$L_{as1} = (1 - \mu)^2 L_{as}, \quad L_{as2} = \mu^2 L_{as}, \quad M_{a1a1} = \mu(1 - \mu) L_{as} \quad (3.7)$$

Donc :

[Rs] et [Rr] Les matrices des résistances statoriques et rotorique

$$[R_s] = \begin{bmatrix} (1 - \mu) r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu r_s \end{bmatrix} \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & & & & \\ & r_r & & & \\ & & r_r & & \\ & & & r_r & \\ & & & & r_r \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

[Lss] et [Lrr] sont les matrices d'inductance statorique et rotorique

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} (1 - \mu)^2 L_s & (1 - \mu) M_s & (1 - \mu) M_s & \mu(1 - \mu) M_s \\ (1 - \mu) M_s & L_s & M_s & \mu M_s \\ (1 - \mu) M_s & M_s & L_s & \mu M_s \\ \mu(1 - \mu) M_s & \mu M_s & \mu M_s & \mu^2 L_s \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

On a aussi :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

[Msr abc] est la matrice des mutuelles des inductance stator et rotor qui est une matrice circulante

$$[M_{sr\ abc}] = M_{sr} \begin{bmatrix} (1-\mu)\cos(\theta) & (1-\mu)\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & (1-\mu)\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \\ \mu\cos(\theta) & \mu\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \mu\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Dans les conditions d'un défaut, le couple électromagnétique s'exprime aussi par la dérivation de l'énergie magnétique. et donc figure ceci :

$$cem = I_{sabc}^t \frac{\partial M_{srabcf}}{\partial \theta} I_r \quad (3.12)$$

À partir de l'ensemble des équations précédentes finalement le modèle défectueux de la GACE est comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d[\varphi_{sf}]}{dt} = -[R_s][B_s]([L_{sd}] - [L_{srd}][L_{rr}]^{-1}[L_{rsd}])^{-1}([\varphi_{absf}] - [L_{srd}][L_{rr}]^{-1}[\varphi_r]) + [v_{nf}] \\ \frac{d[\varphi_r]}{dt} = -[R_r]([L_{rr}] - [L_{rsd}][L_{sd}]^{-1}[L_{srd}])([\varphi_r] - [L_{rsd}][L_{sd}]^{-1}[\varphi_{absf}]) \\ \frac{d[v_{nf}]}{dt} = \frac{1}{C}([T][B_s][C_s]([\varphi_{absf}] - [L_{srd}][L_{rr}]^{-1}[\varphi_r]) - [R_l]^{-1}[v_{nf}]) \\ j\frac{d\Omega}{dt} = T_m \cdot T_e - f \cdot v \cdot \Omega \end{cases} \quad (3.13)$$

### 3.5. Méthode d'analyse des défaut par traitement du signal

Le principe fondamental de l'analyse d'un signal provient de la nécessité de comprendre le résultat des signaux durant le temps de fonctionnement de la machine, que ce soit à l'état sain ou à l'état défaillant. La présence d'un dysfonctionnement est à la source de multiples symptômes comme les bruits, les échauffements, les vibrations, etc. Tous ces symptômes sont autant de signes évidents d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques.

Différentes techniques sont employées pour analyser les signaux sur le plan spectral, soit en observant les changements dans le domaine fréquentiel, soit sur le plan temporel. Parmi ces techniques, il convient de citer la transformée de Fourier rapide ainsi que les ondelettes.[33]

### 3.6. Transformation de Fourier rapide

#### 3.6.1. Définition

La transformée de Fourier rapide est un algorithme de calcul rapide pour la transformée de Fourier discrète. Cette transformation utilise un nombre égal de points  $N$  égal à la puissance 2 ce qui à la fin permet de gagner en temps de calcul supérieur à la transformée de Fourier discrète. De cela il est constaté :

$$\frac{N}{\log_2(N)} \quad (3.14)$$

Cette transformation a pour objectif de fournir l'évolution fréquentielle de toute forme de signaux. Son principe repose sur la décomposition en plusieurs bases de vecteurs sinusoïdaux des signaux  $x(t)$  au moyen du procédé de la FFT. Même si la FFT permet de percevoir le domaine fréquentiel, l'une de ses plus grandes restrictions concerne la détection des phénomènes transitoires qui surviennent dans le signal. Ceux-ci étant non stationnaires, leur contenu spectral est plus difficile à mettre en évidence.[34]

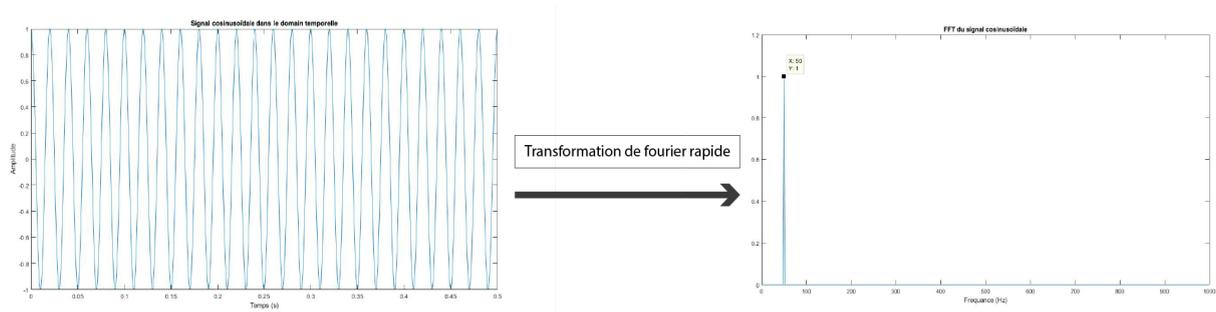


Figure 3.5. Représentation de la FFT temporelle vers fréquentielle.

Pour résoudre ce problème, le chercheur Gabor a introduit en 1964 un tout nouveau concept, la transformée de Fourier à court terme, fondée elle-même sur la notion de fenêtrage. Il s'agit donc de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes.

### 3.6.2. Exemple d'application de la transformée de Fourier FT

#### a. Signal stationnaire

Dans cet exemple, la méthode FFT a été appliquée à un signal stationnaire qui se compose de la somme de deux sinusoïdes, dont l'une présente une amplitude différente tandis que l'autre présente la même amplitude.

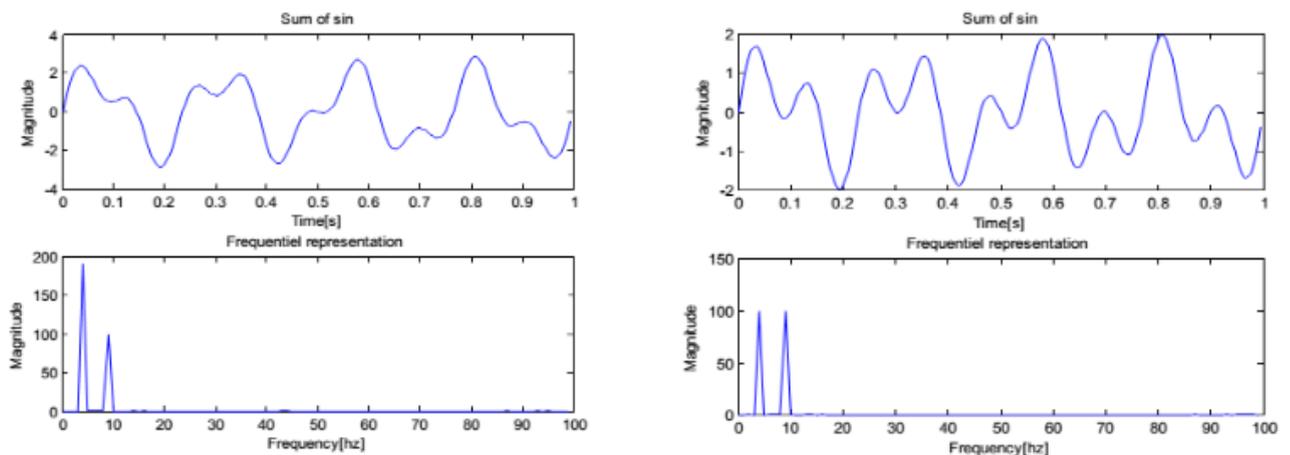


Figure 3.6. Représentation temporelle et fréquentielle de la FFT pour la somme de deux sinusoïdes.

### b. Signal non stationnaire

Dans le deuxième exemple, l'étude se concentrera davantage sur les signaux non stationnaires qui sont une succession de deux sinusoïdes, dont l'une a des amplitudes différentes tandis que l'autre a les mêmes amplitudes.

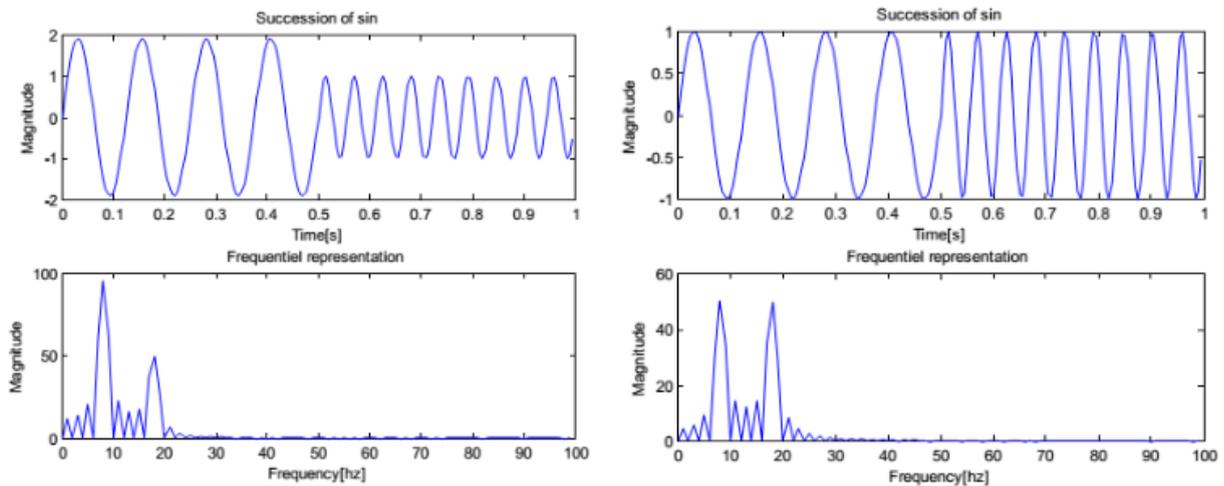


Figure 3.7. Représentation temporelle et fréquentielle de la FFT pour une succession de deux sinusoïdes.

## 3.7. Les ondelettes

### 3.7.1. Définition

Les ondelettes constituent un excellent moyen qui permet de mieux appréhender les signaux par rapport à la FFT. Elles se présentent principalement sous la forme d'ondes limitées dans sa durée ayant une valeur moyenne équivalente à zéro. Cette transformation offre la possibilité d'appliquer une approche multirésolution aux signaux étudiés.

Cette décomposition est équivalente à une analyse atomique à l'échelle réelle, car chaque élément peut être interprété comme une projection localisée du signal traité qui est obtenue à partir d'une ondelette spécifique à la translation dans le temps ainsi qu'à la dilatation tout en étant une fonction localisée dans le plan de temps-échelle.[35]

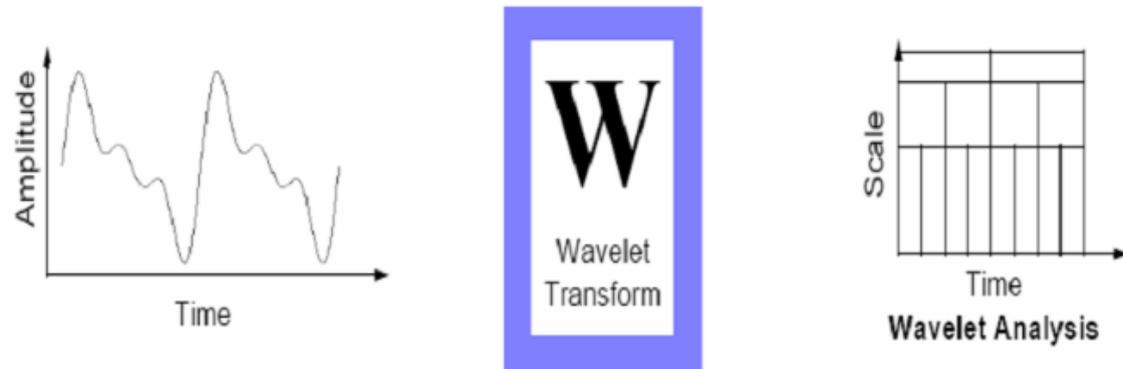


Figure 3.8. Représentation de la transformée vers ondelette.

À titre d'exemple, une transformée en ondelettes d'un signal  $f$  et de la famille  $C(s,u)$  dont les coefficients sont dépendants sur deux paramètres  $s$  et  $u$  où  $s$  indique l'échelle et  $u$  le facteur de position à analyser, et ce, en fonction des besoins et du type de signal à analyser, ces paramètres peuvent être utilisés de deux manières : continue ou discrète.

### 3.7.2. Transformée en ondelettes continue

On lui associe la famille d'ondelettes  $\Psi_{u,s}(t)$  générées par des translations et des dilatations de  $\Psi(t)$ . Ces dernières sont dilatées avec un paramètre d'échelle  $s$ , et translatée par  $u$  comme le représente l'équation 3.15 :

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (3.15)$$

L'ondelette  $\Psi(t)$  est une fonction de moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.16)$$

Parmi une grande famille des ondelettes, il est possible de trouver les ondelettes gaussienne et gaussienne complexe, Morlet et Morlet complexe, chapeau mexicain, Haar, Daubechies, Meyer et Meyer avec une fonction auxiliaire et Ondelette complexe de Shannon.

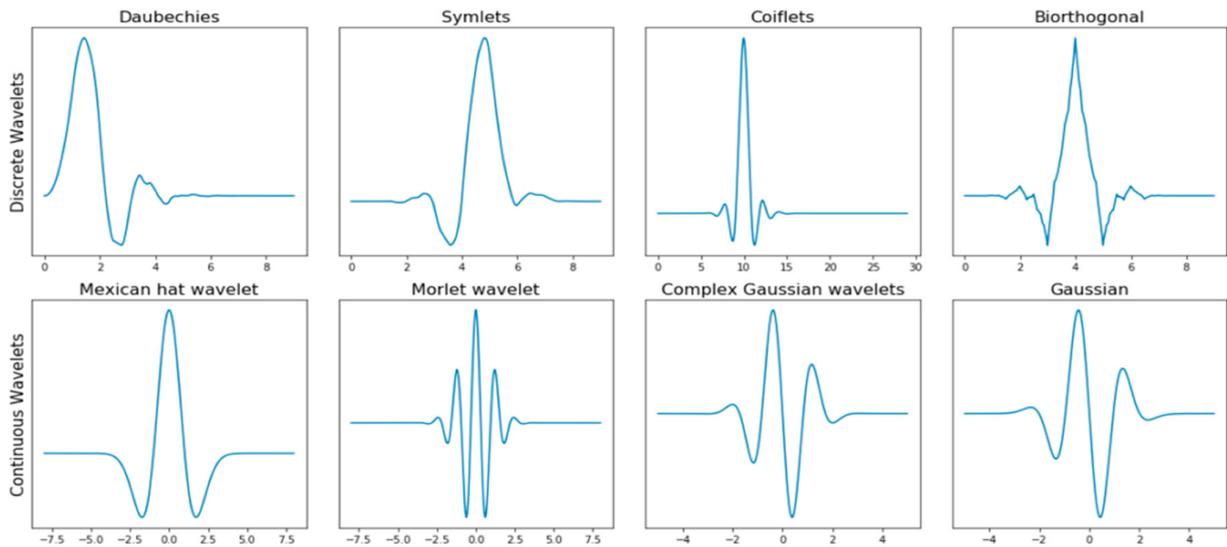


Figure 3.9. Quelques formes des ondelettes usuelles.

Les ondelettes se présentent sous forme constante, mais leur dimension est variable proportionnellement au paramètre de dilatations, cette transformation des ondelettes est aussi connue comme étant un procédé de filtrage dans l'analyse des signaux à l'aide d'un filtre à passe-bande de bande passante variable.

Don la transformée continue par ondelette est définie donc par le calcul des coefficients :

$$C(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (3.17)$$

Le paramètre est un facteur d'échelle, inversement proportionnel à la fréquence. La représentation temps-échelle est une autre manière d'aborder l'analyse du signal par un regroupement d'information fréquentielle et temporelle. Il est à noter que la durée de l'ondelette est directement proportionnelle au paramètre d'échelles.

### 3.7.3. Transformée en ondelettes discrète

#### a. Généralité

La transformée en ondelette discrète est la version continue des ondelettes. La seule différence est qu'elle comporte un facteur d'échelle et une translation

discrétisées. Cette transformation permet une mise en œuvre pratique dans n'importe quel système numérique.[36]

Ainsi, l'analyse en multirésolution permet de traiter le signal en plusieurs fréquences, ce qui facilite la visualisation de multiples points de vue de ce signal.

On forme une base de fonctions d'échelle pour tous  $i \in \mathbb{Z}$  comme suit :

$$\varphi_{i,j} = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i}k - j) \quad (3.18)$$

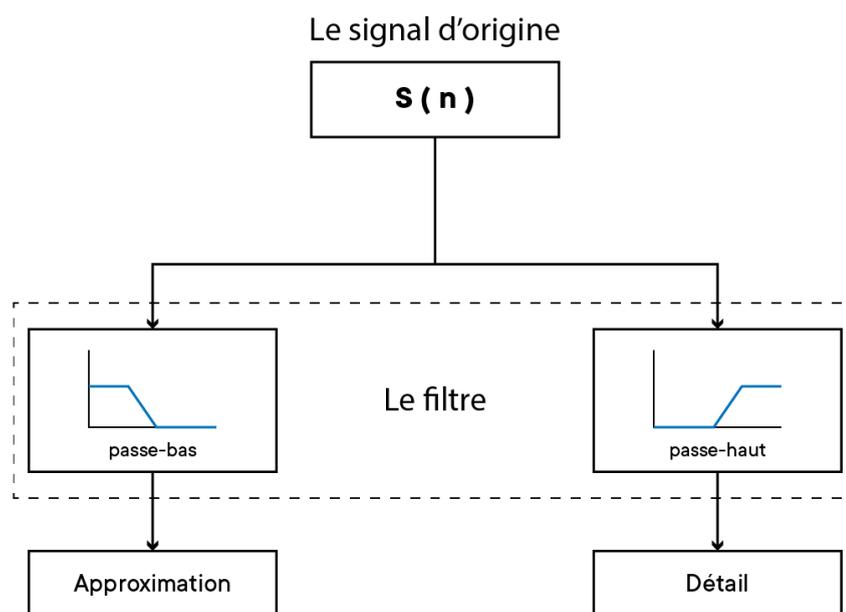
Et de la même manière la base d'ondelette :

$$\Psi_{i,j} = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i}k - j) \quad (3.19)$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\begin{aligned} \varphi(k) &= \sum_j 2^{-h(j)} \varphi(2k - j) \\ \Psi(k) &= \sum_j 2^{-g(j)} \varphi(2k - j) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Ces deux dernières équations représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la résolution haute directement.



**Figure 3.10.** Représentation de la décomposition du signal d'origine.

Avec:

**L'approximation** : la partie grande échelle et de cela les basses-fréquence du signal

**Le détail** : la partie petit échelle et de cela haute-fréquence du signal

On note  $h(j)$  et  $g(j)$  que et sont les filtres passe bas et passe haut lors d'une décomposition par ondelettes.

### 3.7.4. Critère du choix de l'ondelette mère et l'ordre de décomposition

L'extraction d'informations à partir de signaux de transit ou de signaux permanents est un travail rigoureux, surtout lorsqu'on utilise des ondelettes. L'étape la plus importante est le choix des critères de fréquence, de type, d'ordre et de niveau de décomposition des ondelettes, qui jouent tous un rôle important pour une meilleure étude des signaux du système.[37]

#### a. Choix de la fréquence d'échantillonnage

Pour un générateur à cage d'écureuil, il est primordial de choisir la bonne fréquence, car de nombreuses harmoniques peuvent être mélangées. Donc pour les signaux de courant statorique qui est doté d'une fréquence située au-dessus de la bande passe-haut de 0 à 400 Hz et suite à l'application du théorème de Shannon qui donne un minimum de 800 Hz pour la fréquence d'échantillonnage.

Le nombre d'échantillonnages est dicté par l'équation suivante :

$$N_e = \frac{f_e}{R} \quad (3.21)$$

avec:

R : résolution en fréquence

$f_e$  : fréquence d'échantillonnage

$N_e$  : Nombre d'échantillons relevés

### b. Choix du nombre de niveaux de décomposition

Le nombre de niveaux appropriés à une décomposition dépend de la fréquence de l'échantillonnage du signal analysé, ce nombre doit être choisi très soigneusement de manière à couvrir tous les domaines du spectre des fréquences, y compris celui où le défaut se produit lors de son fonctionnement.

Pour calculer le nombre minimum de niveaux nécessaires à l'obtention d'un signal satisfaisant, on a l'équation 3.22 qui a permis de déterminer ce qui suit :

$$2^{-(n_{Ls} + f_s)} f_e < f_s \quad (3.22)$$

En effet, le niveau de décomposition qui inclut l'harmonique autour de la fondamentale est le nombre entier  $(n_{Ls} + 2)$  défini par :

$$n_{Ls} = \text{int} \left( \frac{\log(f_e / f_s)}{\log(2)} \right) \quad (3.23)$$

Avec:

$f_s$  : fréquence du réseau

$f_e$  : fréquence d'échantillonnage

### c. Choix du type de l'onde mère

Les ondelettes Daubechies 40 sont principalement utilisées pour les signaux qui sont étudiés par ce projet, en raison de leur capacité à réduire l'échelle de recouvrement de la bande de fréquence, qui ne peut pas être évitée.

## 3.8. Simulation et analyse des résultats

Pendant ces simulations et analyses, de nombreux résultats sont présentés. Premièrement, une comparaison est faite entre une machine asynchrone saine et une machine défectueuse, afin de mieux comprendre son fonctionnement et d'obtenir

de meilleurs résultats, une analyse des signaux sera effectuée pour mieux extraire les autres informations des signaux.

#### 3.8.1. Simulation de la GACE en défaut de court-circuit entre spire

Dans cette simulation, les résultats visent à démontrer l'évolution des différents signaux du générateur, comme la tension et le courant, ainsi que leur différence par rapport aux signaux du générateur sain.

##### a. La simulation

On a donc les résultats suivant pour une génératrice asynchrone avec un défaut de court-circuit entre spire égale à 10%

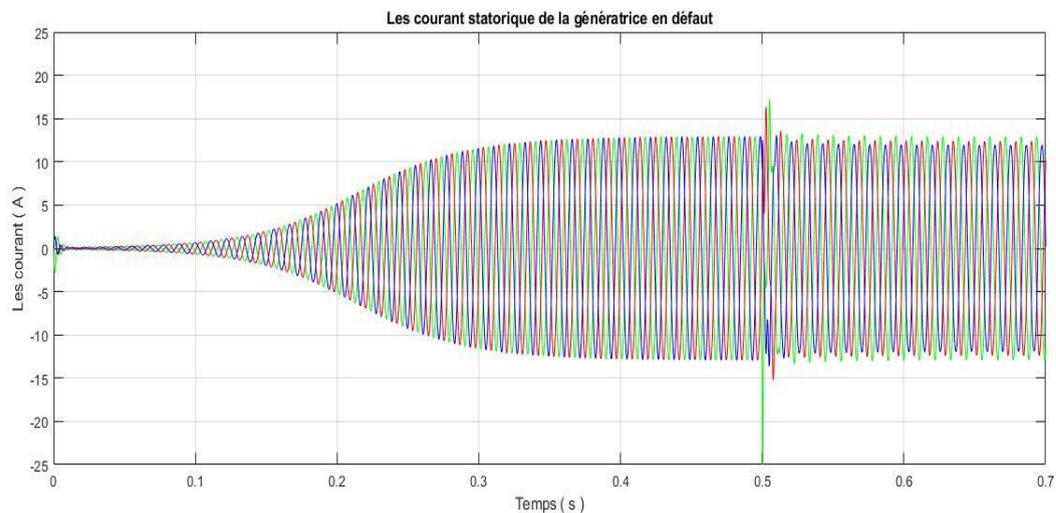


Figure 3.11. Les courants et un agrandissement du signal de la génératrice asynchrone en défaut.

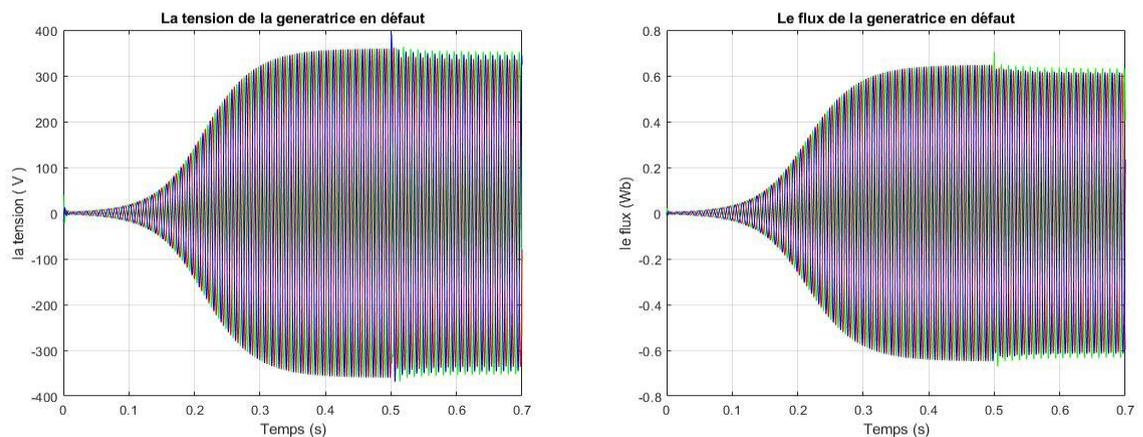


Figure 3.12. Les tensions et flux de la génératrice asynchrone sont en défaut.

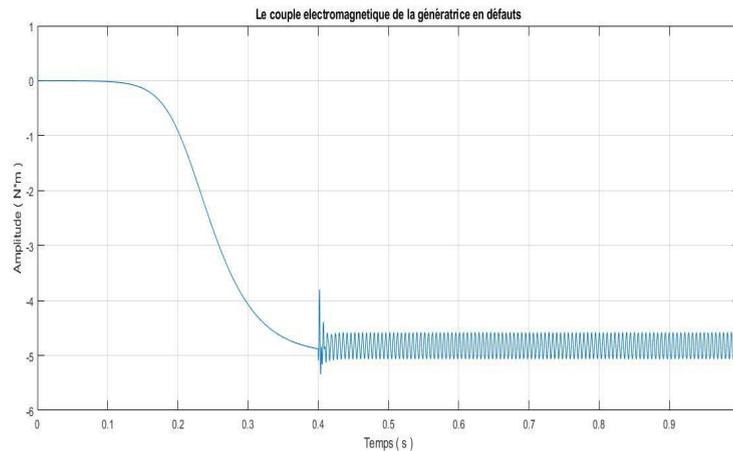


Figure 3.13. Le couple électromagnétique de la génératrice asynchrone est en défaut.

### b. Analyse des résultat

Lors de ce test, la génératrice asynchrone à cage démarre de manière saine, avec un signal conforme à celui observé précédemment. Cependant, après 0,5 seconde de simulation et lorsqu'une défaillance est provoquée, plusieurs phénomènes sont constatés :

- Dans la figure 3.11, l'évolution du courant est en accord avec le modèle précédent où la génératrice se trouvait dans son état sain. Toutefois, au moment où la défaillance survient, un pic de courant se manifeste, provoquant par la suite une augmentation de la valeur du courant de la phase affectée en comparaison aux autres.
- Dans la figure 3.13, au début, le couple électromagnétique est essentiellement conforme à l'état sain, et par conséquent, au moment où la défaillance se présente, des oscillations indésirables apparaissent dues au déséquilibre des inductions statoriques.
- En ce qui concerne le flux et la tension du générateur pendant ce modèle de simulation, ils sont principalement liés au reste des résultats est donc ils montrent une baisse dans leur valeur ainsi qu'une différence entre la phase affectée et les autres.

Lorsqu'il se produit un court-circuit dans les spires statorique, les inductances propres d'une phase touchée du stator subissent des fluctuations.

En conséquence, les autres phases de la génératrice sont également altérées en raison du couplage magnétique. Par ailleurs, plus le court-circuit est important, plus la croissance du courant de la phase affecte est significative.

### 3.8.2. Analyse spectrale des signaux de la machine

Afin de mieux étudier la défaillance d'un court-circuit dans les spires statoriques du générateur asynchrone à cage, plusieurs simulations sont réalisées pour le signal du courant de cette machine en utilisant principalement la transformée de Fourier rapide afin de pouvoir observer l'évolution de leurs fréquences dans ses divers états et les analyser.

#### a. À l'état sain

Dans cette partie de la simulation, l'objectif est de déterminer l'évolution des signaux de la machine par rapport à son domaine fréquentiel et cela grâce à la transformée de Fourier pour une génératrice asynchrone qui fonctionne à l'état sain.

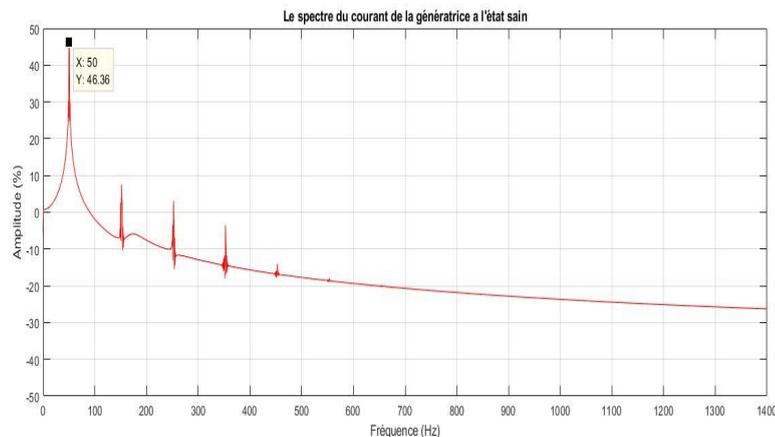


Figure 3.14. Le spectre du courant statorique de la génératrice à l'état sain.

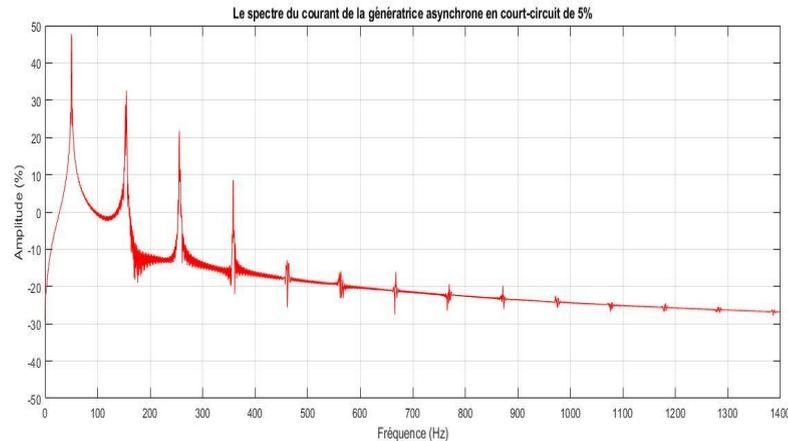
De cela il est noté les résultats des fréquences et amplitudes sous le tableau suivant :

La fréquence ( Hz )	50 le fondamental	152	253	355
L'amplitude ( % )	46.36	9.27	4.24	- 3.12

Tableau 3.1. Fréquence et amplitude de la génératrice à l'état sain

**b. À l'état défectueux**

Ici, la défaillance a été introduite à 5% puis à 10% pour bien démontrer le fonctionnement de la FFT et la manière dont elle peut permettre de mieux comprendre les détails de notre signal.

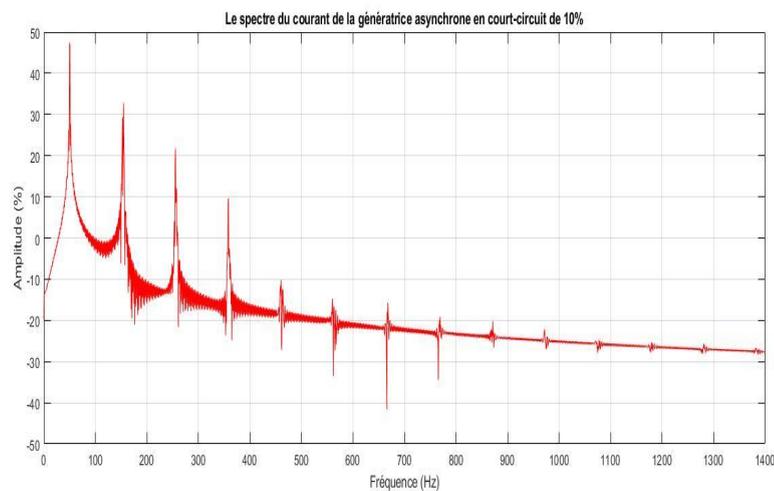


**Figure 3.15.** Le spectre du courant statorique de la génératrice à l'état défectueux avec  $\mu = 5\%$ .

De cela il est notes les résultat des fréquence et amplitude sous le tableaux suivant :

La fréquence ( Hz )	50 le fondamental	152	253	355
L'amplitude ( % )	47.36	32.59	21.7	8.5

**Tableau 3.2.** Fréquence et amplitude de la génératrice en défaut de  $\mu = 5\%$ .



**Figure 3.16.** Le spectre du courant statorique de la génératrice à l'état défectueux avec  $\mu = 10\%$ .

De cela il est notes les résultat des fréquence et amplitude sous le tableaux suivant :

La fréquence ( Hz )	50 le fondamental	152	253	355
L'amplitude ( % )	47.50	33	21.7	9.63

Tableau 3.3. Fréquence et amplitude de la génératrice en défaut de  $\mu = 10\%$ .

#### c. Analyse des résultat

Pour cette analyse, tout d'abord nous nous concentrerons principalement sur l'évolution du courant de la génératrice à l'état sain en ce qui concerne sa fréquence à l'aide de la FFT et constaterons que :

- Pour le résultat de cette simulation, on remarque qu'il y a plusieurs pics de fréquence, le plus grand en amplitude étant le fondamental à 50Hz et à partir de là, de nombreux autres pics apparaissent qui sont égaux à 2 fois, voire 3 fois la fréquence fondamentale jusqu'à ce que le signal se fixe.

Après avoir vu le résultat de la première simulation dans un état sain, on se tourne vers notre système qui est muni d'une défaillance de 5 % et 10 % dans les spires statoriques et on peut traduire les résultats obtenus comme suit :

- Pour une défaillance de 5% on constate que l'amplitude du signal est nettement plus élevée et perturbé tout en conservant les mêmes fréquences.
- Pour une défaillance de 10%, nous pouvons voir que l'amplitude du signal augmente plus qu'auparavant et de même pour les bruits tout en gardant les mêmes fréquences.

Ces résultats nous permettent de conclure que lors d'un changement dans notre système pendant lequel une défaillance est introduite, notamment un

court-circuit dans les spires statoriques, l'amplitude du courant augmente ainsi que l'apparition de bruit en proportion de la sévérité de la défaillance.

En outre, ces résultats sont très intéressants pour illustrer et étudier les cas de défaillance, mais ils ne fournissent pas toutes les informations nécessaires, telles que la période au le défaut se produit et bien plus encore. C'est pourquoi nous tendons à opter pour une méthode plus élaborée, à savoir les ondelettes.

#### 3.8.3. Décomposition des ondelettes

Dans notre décomposition multinationaux, la famille d'ondelettes choisie est évidemment Daubechies 40 pour obtenir le meilleur type de résultat ainsi que la conservation des détails D5, D4, D3 et du signal d'approximation A5 ; de cette manière, la première étape consiste à analyser l'état sain de la machine, puis son état défectueux.

##### a. La simulation

Ici présent la décomposition des signaux du courant de la génératrice dans son état sain sans charge :

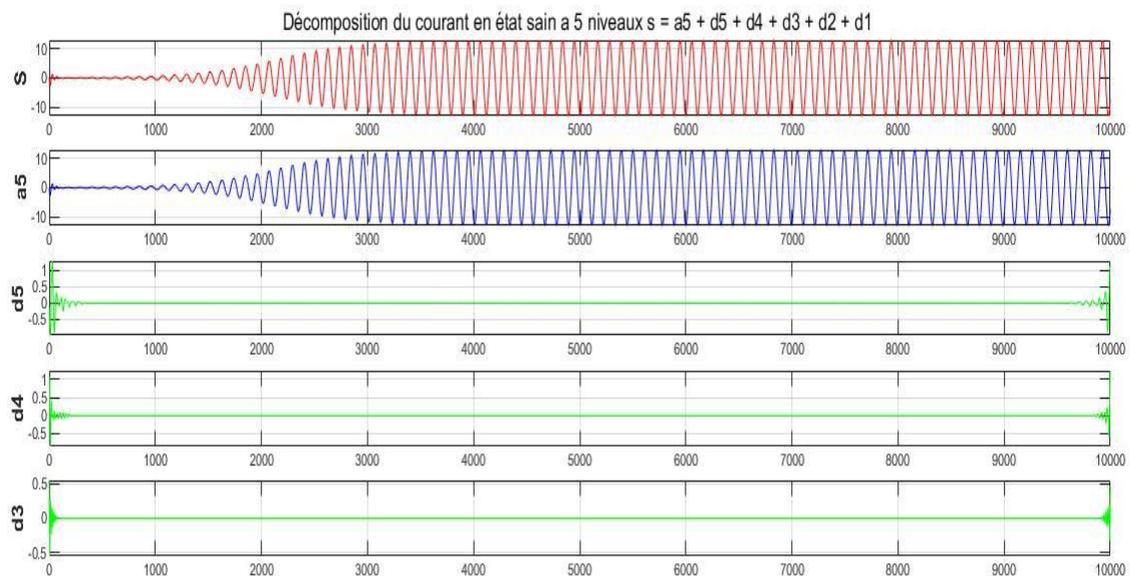


Figure 3.17. Décomposition multi-niveau du courant statorique "ias" à l'état sain.

de même se présent la décomposition des signaux du courant de la génératrice dans son état sain avec charge :

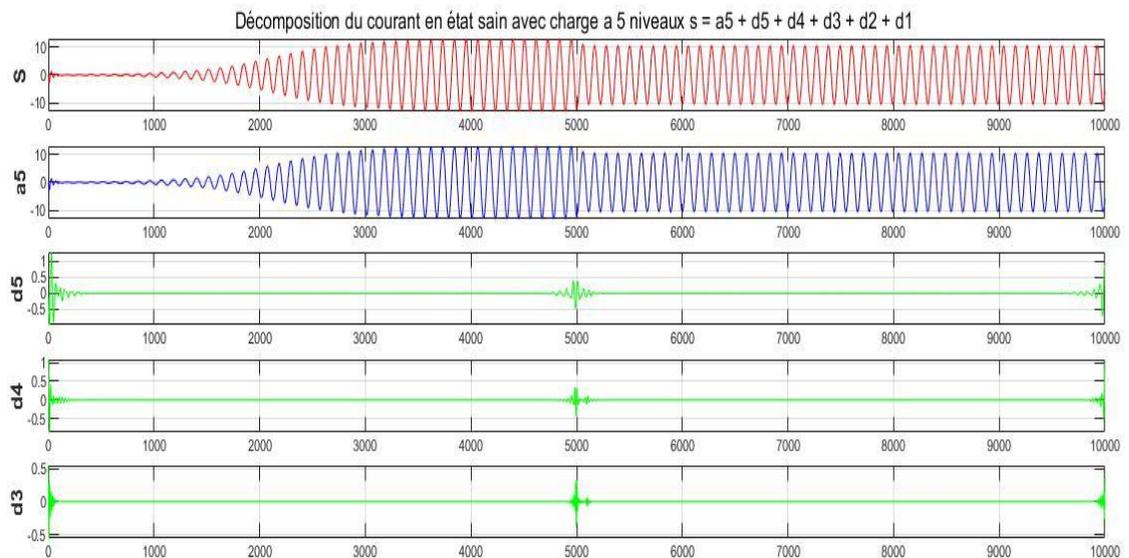


Figure 3.18. Décomposition multi-niveau du courant statorique “ias” à l'état sain avec charge.

Voici la décomposition lorsque le générateur asynchrone est en court-circuit des spires  $\mu = 5\%$  :

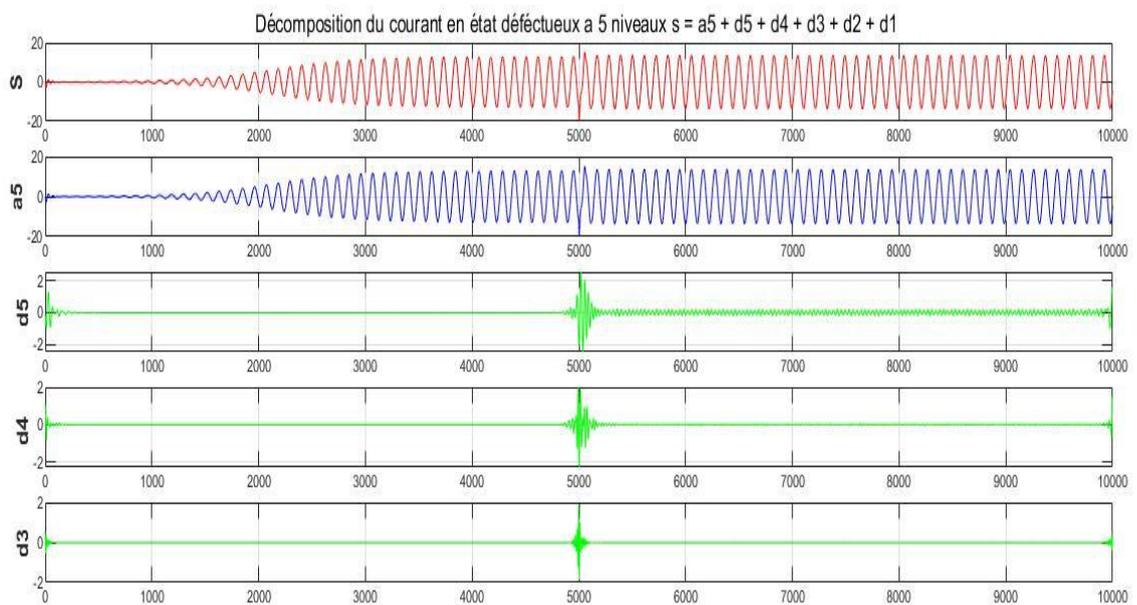
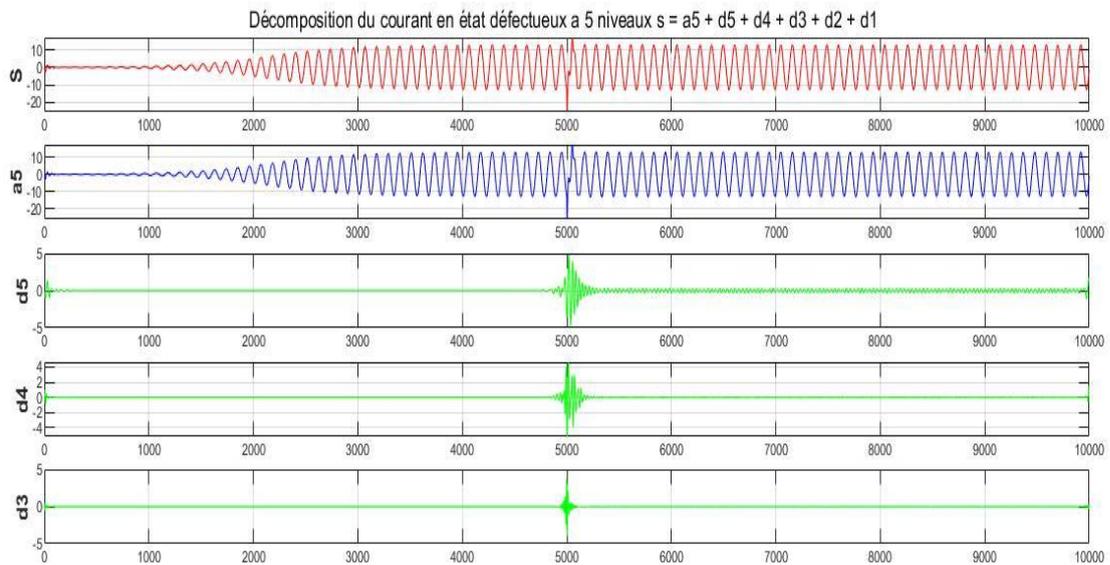


Figure 3.19. Décomposition multi-niveau du courant statorique “ias” en présence de défaut 5%.

Finalement la décomposition durant que le générateur asynchrone est en court-circuit des spires  $\mu = 10\%$ .



**Figure 3.20.** Décomposition multi-niveau du courant statorique “ias” en présence de défaut 10%.

### b. Analyse des résultat

Au cours de ce test de différents états du générateur asynchrone, il est assez facile de remarquer que l'utilisation de la décomposition de l'ondelette permet d'extraire et de localiser le point de non-stationnarité qui accompagne la défaillance de court-circuit entre les spires statoriques.

- L'évolution des courbes du courant dans son état sain du fait de sa décomposition est stable et ne représente aucun changement brusque qui peut nuire à la génératrice.
- Pour une charge introduite au moment  $t = 0.5s$  de la simulation un pic d'amplitude sur les décompositions peut se voir et cela dû au changement brusque lors de l'introduction d'une charge.
- Pour les défauts à 5% la décomposition de composant D5, D4, D3 l'amplitude de ces coefficients devient plus grande soudainement lorsque le défaut est présenté et le signal est bruité au cours de son fonctionnement en défaut.
- Il en va de même pour la composante de la décomposition dans l'état de défaillance à 10 %, puisqu'elle est également détectée facilement

par un pic d'amplitude, bien que ses valeurs soient légèrement plus élevées au précédent défaut.

On conclut que de défaut de court-circuit d'une phase engendre une variation brusque de d'amplitude et aussi la suite du signal est parasité au moment de l'ouverture cela est dû au fait que le courant ou la défaillance arrive il perd son équilibre.

### 3.9. Conclusion

Enfin, dans ce dernier chapitre, de nombreux cas sont étudiés où il est constaté en premier lieu l'effet d'une défaillance dans le générateur asynchrone plus particulièrement la défaillance d'un court-circuit dans les spires statoriques qui affectent les performances globales de la machine.

Cette étude a ainsi conduit à la mise au point d'une meilleure méthode de détection et d'analyse des signaux de la machine en utilisant la transformée de Fourier rapide puis une méthode plus avancée, à savoir les ondelettes.

Il est essentiel de pouvoir comprendre les phénomènes qui se produisent lors d'une défaillance de la machine, étant donné que cette défaillance peut entraîner des résultats plus catastrophiques, tels que le dysfonctionnement complet de la machine et l'arrêt de toute la production dans une application éolienne.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

---

Enfin, au terme de cette étude dont l'objectif principal était d'analyser le comportement d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil lors d'un court-circuit de spires statoriques afin d'améliorer la mise en œuvre et la détection des défaillances lors de son application ultérieure à un système éolien, nous pouvons déduire de l'ensemble de ce travail quelques points principaux concernant chacun des chapitres.

Tout d'abord, comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, les générateurs des systèmes d'éoliennes sont très divers et évoluent constamment, et le générateur asynchrone étant l'un des choix les plus populaires, sa méthode de modélisation et de détection des défaillances est très variée.

En outre, sur le deuxième chapitre où il a été question de modéliser la génératrice asynchrone dans un état sain en utilisant plusieurs types de méthodes, il a été convenu de considérer le modèle "abc" comme étant le plus approprié pour établir un diagnostic du fait de sa rapidité, sa précision et de son inclusion totale des différentes fonctions présentes dans le système.

Finalement, tout au long du troisième chapitre, comme mentionné précédemment, le comportement de la génératrice asynchrone durant un court-circuit des spires statoriques peut conduire à des résultats catastrophiques du point de la production d'énergie, voire même à la destruction totale de la machine, ce qui explique pourquoi, afin de mieux diagnostiquer ce type de défaillance, il a fallu se concentrer sur les différentes méthodes employées pour le diagnostic, dont la transformée de Fourier rapide qui, lorsqu'elle s'est avérée insuffisante, a été remplacée par des approches plus précises qui sont les ondelettes, ce qui a permis d'obtenir un diagnostic plus complet pour ce type de défaillance.

Ainsi, ce projet se conclut par des résultats positifs et par une avancée dans le domaine des diagnostics des systèmes éoliens, et plus particulièrement des générateurs asynchrones à cage employés par ces derniers.

# Bibliographie

---

- [1] Mark Hutchinson, Feng Zhao : “Global Wind Report 2023”, Global Wind Energy Council, 2023.
- [2] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers : “wind energy explained theory design and application”, John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [3] Hengameh Kojooyan Jafari, “Advances in Wind Power”, Rupp Carriveau, 2012.
- [4] N. Laverdure “Sur l’intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires”, thèse de doctorat de l’INPG, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2005.
- [5] A. Teninge, “participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire “, thèse de doctorat de l’INPG, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2009.
- [6] S. Ziraoui, “Modélisation et étude d’un système d’énergie éolienne relié au réseau”, mémoire de Master, Université de Badji Mokhtar- Annaba ,Algérie, 2017.
- [7] Support de cours école polytechnique de Bruxelles, J.C Maun.
- [8] M. Bellier et A. Galichon, “ Machines électriques ”, Librairie Delagrave, 1980.
- [9] Michel pinard «commande électronique des moteurs électriques».Dunod, Paris, 1998
- [10] H. Brahim et T. El Moataz Bellah ,“Commande Vectorielle d’une Machine Asynchrone à cage d’Écureuil”, Mémoire de Master, Université de Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, Algérie, 2022.
- [11] T. Hemiani et S. Ameziane, “Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone fonctionnant en régime déséquilibré”, mémoire de Master ,Université de Blida 1, Algérie, 2021.
- [12] Gaétan DIDIER, “Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances”, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2004.
- [13] Belhait Housseem Eddine, “Détection des défauts de moteur asynchrone par l’analyse de courant statorique”, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2020.
- [14] A. H. Bonnett et G. C. Soukup, “Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28: 921–937,08/1992.
- [15] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, “Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24(6):1124–1130, 12/1988.
- [16] R. Bigret and J. L. Féron, “Diagnostic - maintenance - disponibilité des machines tournantes”, Masson, 1955.
- [17] P.J. Travner, B.G. Gaydon and D.M. Ward, “Monitoring generator and large motors”, IEE, Angletaire, May 1986

# Bibliographie

---

- [18] Austin H. Bonnett, "Safety consideration for the application installation operation , and maintenance of industrial AC induction motors", IEEE Trans. Ind. Appli, vol 25, Décembre 1989.
- [19] Mr HARIR Miloud, "Etude des Défaits dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée", Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, Algérie, 2009.
- [20] M. Drif et N. Benouzza et B. Kraloua et A. Bendiabdellah et J.A. Dente, "Squirrel cage rotor faults detection by instantaneous power spectrum approach", IEEE SDEMPED 01, Juin 2002.
- [21] A. Bouzida "diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2008.
- [22] B. Abdelmalek et T. Ali, "Étude et Modélisation d'une Génératrice Asynchrone à Cage dans un Système Éolien", Mémoire de master, Université de Blida 1, Algérie, 2021.
- [23] Pr. F. Zidani et Pr. M.-S. Nait-Said et A. Makouf, "Commande des machines électriques moteur asynchrone", Support de Cours, Université de Batna 2, Algérie, 2020.
- [24] Djilali Kouchih et Redouane Hachelaf, "Theoretical and Experimental Analysis of the Squirrel Cage Induction Generators Operating under Unbalanced Conditions", Research Square, Algérie, 12/2022.
- [25] Frédéric Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [26] B. Faïza, "Retour au réseau de la génératrice asynchrone auto-amorcée", Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Algérie, 2019.
- [27] Grégory Peset, "Nouvelle approche pour la prédétermination des caractéristiques externes des génératrices asynchrone fonctionnant dans le cadre de l'ilotage", Mémoire de Maîtrise en ingénierie, Université du Québec canada, 2003.
- [28] A. M. Alfrhan, "Modelling of Magnetizing Inductance Saturation in Self-Excited Induction Generator", Thèse de doctorat, Université de Newcastle, Angleterre, 2016.
- [29] D. Rekioua, T. Rekioua, K. Idjdarene et A. Tounzi, "An approach for the modeling of an autonomous induction generator taking into account the saturation effect", International Journal of Emerging Electric Power Systems ,Algérie, vol. 4,01/2005.
- [30] Z. Kacimi et S. Kobbi, "Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaut Statorique par la technique des ondelettes", Mémoire de Master, Université de Blida 1, Blida (Algérie), 2016.
- [31] H. Razik, "le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance", Vandoeuvre-Lès-Nancy, France , 2002,

# Bibliographie

---

- [32] R.Hachelaf, D. Moussaoui, "Surveillance du court-circuit inter spire d'un moteur asynchrone par analyse du courant", Laboratoire des Systèmes Électromagnétiques, Bordj El Bahri, Algérie, 2010.
- [33] M. Ayache et Y. El fani, "Modélisation et Diagnostic des défauts de court-circuit entre spires d'une machine asynchrone", Mémoire de master, Université de blida 1, Blida(Algérie), 2018.
- [34] E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and its applications," Prentice Hall, 1988.
- [35] BOURDIM SAMIA «Méthodes ondelettes et bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones» Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, Algérie, 2011.
- [36] H-G. Stark "Wavelets and signal processing" University of Applied Sciences, ISBN 3-540-23433-0, Springer, Germany, 2005.
- [37] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.M. Poggi " Wavelet Toolbox for use with MATLAB " by The MathWorks, 2002.