

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : *Maintenance industrielle*

Par . *BELKADI Mohammed*

Sujet

DIAGNOSTIC D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE

ALIMENTATION D'UNE EOLIENNE

Soutenu publiquement, le 15 / 06 / 2016 , devant le jury composé de :

M. HAMZA CHERIF. M	MCB	Univ. Tlemcen	Président
M. ZINAI. A	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. BOUKHALFA. A	MCA	Univ. Tlemcen	Examinateur
M. BELKAID. M	MAA	Univ. Tlemcen	Examinateur



Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux être qui me sont

Les plus chers

*A mes chers parents qui m'ont toujours encouragé
symbole de tendresse pour leurs sacrifices
inestimables.*

A mes sœurs.

A toute ma famille.

A mes amis.

*Atouts la promo de master 2 Maintenance
Industrielle (2015_2016)*

Mohammed 2016



Remerciements

Je remercie Allah tout puissant qui m'a donné la force et la volonté pour pouvoir finir ce mémoire de master.

Je tiens tout d'abord exprimer ma gratitude à mon directeur de mémoire Mr ZINAI A pour la confiance qu'il m'accordée, ses encouragements, et ses précieux Conseils, et pour leur effort avec mois dans ce travail.

Je remercie beaucoup monsieur HAMZA CHERIF M, MCB à l'université de technologie de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce travail et d'assurer la présidence de jury.

Je remercie beaucoup monsieur BOUKHALFA. A MCA à l'université de technologie de Tlemcen, monsieur BELKAID M, d'avoir accepté d'examiner le travail.

Je remercie mes collègues et mes amis

Enfin, je remercie bien sûr mes parents pour m'avoir supporté pendant plusieurs années de recherche.

Mohammed



ملخص

في هذا المشروع، قد قمنا بدراسة تشخيص اعطاب المدحرجة للجهاز غير المتزامن عن طريق تطبيق شجرة القرارات. وقد عرضنا مكونات نظام تحويل طاقة الرياح الرئيسية وعملياتها. درسنا مختلف الطرق لتشخيص الأخطاء في الجهاز غير المتزامن. يتم إجراء دراسة حول أصول مختلفة من فشل الجهاز غير المتزامن لتوربينات الرياح. ويتم التعامل في إنشاء بناء شجرة القرارات بأمثلة. ويستند هذا الأخير على خوارزميات تصنيف واستخدام برنامج WEKA لكشف وتصنيف العيوب في المدحرجات. في النهاية النتائج موضحة في الرسومات.

الكلمات المفتاحية: الآلات غير متزامنة، العيوب، التشخيص، شجرة القرارات، برنامج WEKA.

Abstract

In this project, we studied the diagnosis of the defects in the rotations of the asynchronous machine by the application of the decision tree. We presented the main wind components of a system of conversion of the energy as well as their functioning. We examined various methods of diagnosis of the defects of the asynchronous machine. The study on the various origins of the failures of the asynchronous machine is made for a wind turbine. The establishment of the construction of the decision tree is handled with examples. The latter is based on the algorithms of classification and by using WEKA software to detect and classify the defects in the rotations. At the end of the obtained results are illustrated by figures.

Keywords: asynchronous Machine, defects, diagnosis, the decision tree, software WEKA.

Résumé

Dans ce projet, nous avons étudié le diagnostic des défauts dans les roulements de la machine asynchrone par l'application de l'arbre de décision. Nous avons présenté les composants principaux d'un système de conversion de l'énergie éoliens ainsi que leur fonctionnement. Nous avons examiné des différentes méthodes de diagnostic des défauts de la machine asynchrone. L'étude sur les différentes origines des défaillances de la machine asynchrone est réalisée pour une éolienne. L'établissement de la construction de l'arbre de décision est traité avec des exemples. Ce dernier est basée sur les algorithmes de classification et en utilisant logiciel WEKA pour détecter et classer les défauts dans les roulements. En fin des résultats obtenus sont illustré par des figures.

Mots clés : Machine asynchrone, défauts, diagnostic, l'arbre de décision, logiciel WEKA.

SOMMAIRE

Résumé.....	I
Sommaire.....	II
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux	VIII
Liste des symboles	IX
Introduction générale	1

Chapitre I : Energie éolienne

INTRODUCTION	3
I.1. Différents types d'éoliennes.....	4
I.1.1. Eoliennes à axe vertical.....	4
I.1.1.1. Le rotor de Savonius	4
I.1.1.2. Le rotor de Darrieus.....	5
I.1.2. Eoliennes à axe horizontal.....	5
I.2. Principaux composants d'une éolienne	6
I.2.1. Le mât (tour)	7
I.2.2. La nacelle.....	7
I.2.3. Le rotor	7
I.2.3.1. Moyeu	7
I.2.3.2. Les pâles	8
I.3. Chaîne de conversion de l'énergie éolienne.....	10
I.3.1. Principe de conversion de l'énergie éolienne	10
I.3.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	11
I.3.2.1. Avantages	11
I.3.2.2. Les inconvénients	11

Sommaire

I.4.Structures du système de conversion de l'énergie éolienne	12
I.4.1.Fonctionnement à vitesse fixe	12
I.4.2.Fonctionnement à vitesse variable	13
I.4.2.1.Machine asynchrone à cage (MAS):.....	14
I.4.2.2.Machine asynchrone à double stator	15
I.4.2.3.Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance.....	16
I.4.2.4.Machine asynchrone à double alimentation type "brushless"	17
I.4.2.5.Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné	18
I.4.2.5.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie Rotorique dissipée	19
I.4.2.5.2. Machine asynchrone à double alimentation-structure de KRAMER	20
I.4.2.5.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	21
I.4.2.5.4. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	22
i.5.Avantages et inconvénients de la MADA.....	23
I.5.1. Avantages de la MADA	23
I.5.2. Inconvénients de la MADA.....	24

Chapitre II : Diagnostic et défaut de la machine

II.1. Terminologie au diagnostic.....	26
II.1.1. Défaut (<i>Fault</i>).....	26
II.1.2. Défaillance (<i>Failure</i>).....	26
II.1.3. Panne : (<i>Break-down</i>).....	28
II.1.4. Symptôme (Symptom).....	29
II.1.5. Résidu (Résiduel)	29

Sommaire

II.1.6. Diagnostic.....	30
II.1.7. Perturbation.....	30
II.2. Notion de diagnostic d'un système.....	31
II.2.1. Procédures de diagnostic.....	31
II.2.2. Types de défauts.....	31
II.2.2.1. Défauts actionneurs.....	32
II.2.2.2. Défauts procédés.....	32
II.2.2.3. Défauts capteurs.....	32
II.2.3. Approches de diagnostic.....	32
II.2.3.1. Principe de l'approche qualitative.....	34
II.2.3.2. Principe de l'approche quantitative.....	34
II.2.3.3. Diagnostic à base de modèles.....	35
II.2.3.4. Diagnostic sans modèle à priori.....	36
II.3. Différentes défaillances dans les systèmes éoliens.....	37
II.3.1. Les défaillances du contrôle électrique.....	42
II.3.2. Les défaillances du système d'orientation.....	42
II.3.3. Les défaillances de la boîte de vitesses.....	42
II.3.4. Les défaillances du réseau.....	42
II.3.5. Les défaillances hydrauliques.....	42
II.3.6. Les défaillances des pales.....	43
II.4. Les différents défauts des machines asynchrones.....	43
II.4.1. Défaillances électriques.....	44
II.4.1.1. Types et causes de défauts dans les machines électriques.....	44
II.4.1.1.1. Défauts statoriques.....	45
II.4.1.1.2. Défauts rotoriques.....	46
II.4.1.1.3. Défauts de roulement.....	48
II.4.1.1.4. Autres défauts.....	48
II.4.1.1.5. Causes des défauts.....	48

Sommaire

II.4.2. Défaillances mécaniques.....	49
--------------------------------------	----

Chapitre III : Différents défauts des machines asynchrones

III .1. Défaillances de la machine asynchrone et leurs origines.....	51
III.1.1.Défaillances d'ordre mécanique.....	51
III .1.1.1. Défauts des roulements.....	51
III .1.1.2. Défauts d'excentricité.....	52
III .1.1.3. Défauts du flasque.....	54
III .1.2. Défaillances d'ordre électrique.....	54
III .1.2.1. Défauts des circuits électriques statoriques.....	54
III .1.2.2. Défauts des circuits électriques rotoriques.....	55

Chapitre IV : L'application de l'arbre de décision pour la détection des défauts de roulements

IV.1.Arbre de décision.....	56
IV.2.Choix des attributs et des classes	57
IV.2.1.Choix des attributs	57
V.2.2.Choix des classes	57
IV.3.Détection des défauts de roulement.....	58
IV.4.Etablissement de l'arbre de décision.....	58
IV.4.1.Logiciel WEKA.....	58
IV.4.2.Extraction des données et export sous format (ARFF).....	59
IV.4.3.Connexion au fichier de données	59
IV.4.4.Etablissement de l'arbre de décision	63
IV.4.5.Analyse de l'arbre	69

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexe

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure. I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	3
Figure. I.2:Le roto de Savonius	4
Figure. I. 3: Rotor de Darrieus.....	5
Figure. I.4: Turbine à axe horizontal.....	6
Figure. I.5: Principales composantes d'une turbine éolienne.....	6
Figure I.6: Moyeu à 3 pâles	8
Figure I.7: Schéma d'une pôle.....	8
Figure I.8: différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW).....	9
Figure I.9: principale de la conversion de l'énergie éolienne.....	11
Figure I.10: éolienne à vitesse fixe.....	12
Figure I.11: Système à vitesse variable par dissipation de la puissance rotorique.....	13
Figure I.12:Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe).....	15
Figure. I.13: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence Variable.....	15
Figure 1.14: Machine asynchrone à double stator.....	16
Figure 1.15: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur.....	17
Figure 1.16: MADA à double stator.....	18
Figure 1.17: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.....	18
Figure 1.18: Machine asynchrone à rotor bobiné	19
Figure I.19: MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique...	20
Figure. I.20: MADA structure Kramer.....	20
Figure.1.21: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	21
Figure.1.22: Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur.....	22
Figure.1.23: Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	23

CHAPITRE II

Figure. II.1. Anomalies et Observations classées par criticité croissante.....	30
Figure. II.2 : Différentes méthodes de diagnostic.....	34
Figure. II.3. Les distributions de nombre de défaillances en comparant avec les temps d'arrêt par composant pour les centrales éoliennes suédoises sur la période 2000- 2004.....	38
Figure II.4. Nombre de défaillances en fonction de l'année d'opération.....	39
Figure II.5. Comparaison des taux de défaillance pour différents types des systèmes éoliens.....	40
Figure. II.6: Statistiques des défauts MAS de faible et moyenne puissance.....	44
Figure. II.7: Statistiques des défauts MAS de grande puissance.....	45

Liste des figures

Figure II.8: Représentation de l'excentricité statique.....	49
Figure II.9: Représentation de l'excentricité dynamique.....	50

CHAPITRE III

Figure III.1 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes.....	51
Figure III.2: L'excentricité statique et dynamique.....	53
Figure III.3: L'excentricité mixte.....	53

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : schéma pour l'extraction des connaissances.....	56
Figure IV.2: Attributs et décisions.....	58
Figure IV.3 : Logiciel WEKA.....	59
Figure IV.4: L'arbre de décision.....	68

Liste des tableaux

Tableau 1: Résultats d'un aperçu sur des défaillances.....	41
Tableau 2: Attributs de l'arbre de décision.....	57
Tableau 3: Classes de l'arbre de décision.....	57

Liste des abréviations

MAS :	Machine Asynchrone
MADA :	Machine Asynchrone Double Alimentation
MACE :	Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil
IGBT :	Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée)
GTO :	Great Teacher Onizuka (grand (super)professeur onizuka)
HT :	Haute Tension (haut tension)
MLI :	Modulation de Largeur D'impulsion
DM :	Data Mining (fouille de données)
BCU :	Bearing Condition Unit (comportement d'unité de condition)
ARFF :	Attribute-Relation File Format (Format de fichier attribut-Relation)
SKF :	Sveska Kullager Fabriken (Fabrique suédoise de roulements à billes)
WEKA :	Waikato Environment for Knowledge Analysis (environnement Waikato pour l'analyse de connaissances)

Introduction

Machine asynchrone à double alimentation d'être le meilleur candidat pour travailler en association avec des énergies dites énergies renouvelables, que l'homme essaye à tout prix de les faire exploiter. Dans ce cadre, des efforts énormes de recherches ont été déployés afin de mieux exploiter cette robuste machine. Depuis plusieurs décennies, l'homme est devenu de plus en plus convaincu de la nécessité de nouvelles sources plus propres et plus rentables d'énergie. Ceci a pour but soit de renforcer celles déjà existantes, soit de les remplacer carrément. Dans ce contexte, il ne trouvera pas mieux que l'énergie éolienne. Cette dernière présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes pour les centrales nucléaires qui rendent notre énergie peu attractive pour les générations futures [1].

Les ressources de l'énergie éolienne n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique. Face à ces problèmes, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites renouvelables. L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme.

Dans le cadre du développement durable; les modes de production reposant sur la transformation d'énergie renouvelable (Eolien, Solaire...), sont appelés à être de plus en plus utilisés et pour réaliser ceci, il est important de disposer de différentes technologies de générateurs telles que les machines synchrones et les machines à aimant permanent.

Connue depuis 1899, la machine asynchrone à double alimentation (MADA). En anglais «Doubly Fed Induction machine DFIM » est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné. La MADA utilisée pour la génération d'énergie électrique dans un site isolé est considérés comme une solution écologique intéressante et qui offrent d'excellents compromis performances, coûts [2].

Pour une bonne surveillance de tels dispositifs complexes, il convient de développer des systèmes de diagnostic disposant d'une certaine faculté d'adaptation à des situations nouvelles (apprentissage), et permettant une reconnaissance fiable (décision) du mode de fonctionnement dans lequel le système évolue.

Le diagnostic peut être défini comme un processus en trois phases : la détection d'un défaut de mode de fonctionnement, son identification et la localisation de sa cause.

Certaines utilisations de MADA ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur accouplement, défauts des roulements, ...) ou électrique et magnétique (court-circuit dans les bobinages statoriques et rotoriques).

La naissance d'un défaut dans la MADA lors de son fonctionnement n'implique pas l'arrêt instantané de la machine, mais il affecte directement les performances de la machine telles que le couple électromagnétique, les courants et la vitesse.

D'où la nécessité du diagnostic de la machine pour identifier, localiser et déterminer les causes des défauts. Un défaut physique n'est pas évident à localiser avec des capteurs, surtout si le défaut se retrouve au rotor, à cause du mouvement de ce dernier.

Ce travail s'inscrit dans le domaine de la surveillance et le diagnostic des défauts des roulements de la machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne par l'application de l'arbre de décision. Il débute par un premier chapitre nous commençons par une description des différentes structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients pour chaque structure, Enfin ce chapitre est clôturé par une conclusion. Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous donnons des généralités sur les différentes techniques de diagnostic notamment le diagnostic interne et externe. Dans le troisième chapitre, nous avons évoqué sur les différents d'origine des défaillances de la machine asynchrone. Le quatrième chapitre ; nous l'avons consacré aux le principe de la construction de l'arbre de décision et définie les étapes des algorithmes de classification (*le logiciel Waikato Environment for Knowledge Analysis "WEKA"*) pour détecter et classer les défauts dans les roulements.

On termine notre travail par une conclusion générale

CHAPITRE I :

Energie éolienne

Introduction

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.1).

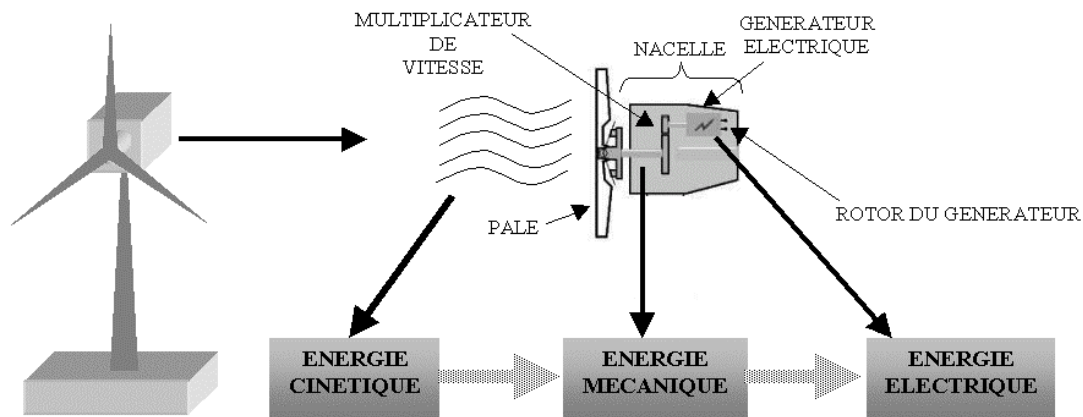


Figure. I.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent [3]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. [3]

I.1. Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal

I.1.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation: le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus. [4]

I.1.1.1. Le rotor de Savonius

Il est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. L'écoulement interne favorise les caractéristiques de performance de la machine. Le coefficient C_p maximal atteint 0.3. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. A titre d'exemple, des machines de plusieurs kilowatts ont été réalisées pour assurer le pompage de l'eau dans les pays du Sahel; elles démarrent à des vitesses de vent faibles, voisines de 2 à 3 m/s. Ces systèmes présentent cependant beaucoup plus d'inconvénients que d'avantages dans les réalisations actuelles, en particulier ils nécessitent comme les systèmes à axe horizontal parallèle « au vent » un dispositif d'orientation. La récupération de l'énergie produite est en général beaucoup plus compliquée et se traduit souvent par une perte sensible du rendement global (figure. I.2).

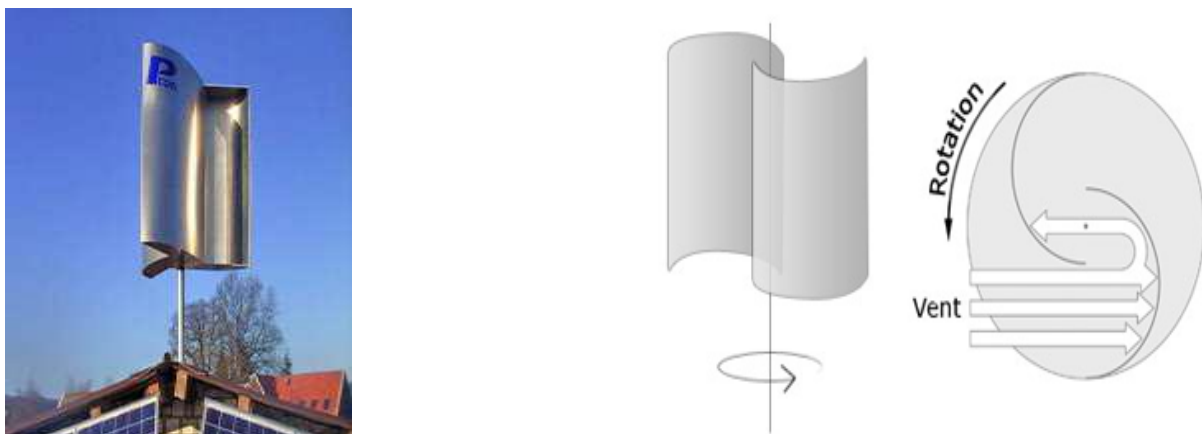


Figure. I.2. Le rotor de Savonius [4]

I.1.1.2. Le rotor de Darrieus

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 (1920-1935) par le Français Darrieus. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique... (Figure. I. 3) [7]

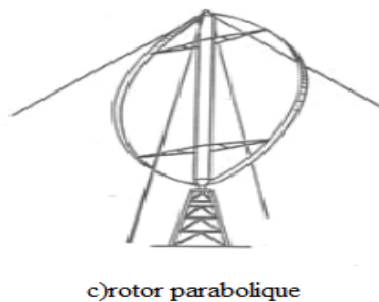
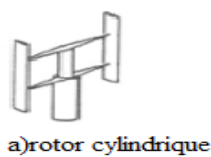


Figure. I. 3. Rotor de Darrieus [7]

I.1.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde. Ce système se base sur le principe de portance aérodynamique, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine. Les éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales, ceci pour plusieurs raisons: [6]

- Elles sont légères et donc moins chères,
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites,
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse du vent,



Figure. I.4. Turbine à axe horizontal. [6]

I.2. Principaux composants d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux: [4]

- Le mât
- La nacelle
- Le rotor (moyeu et les pâles)

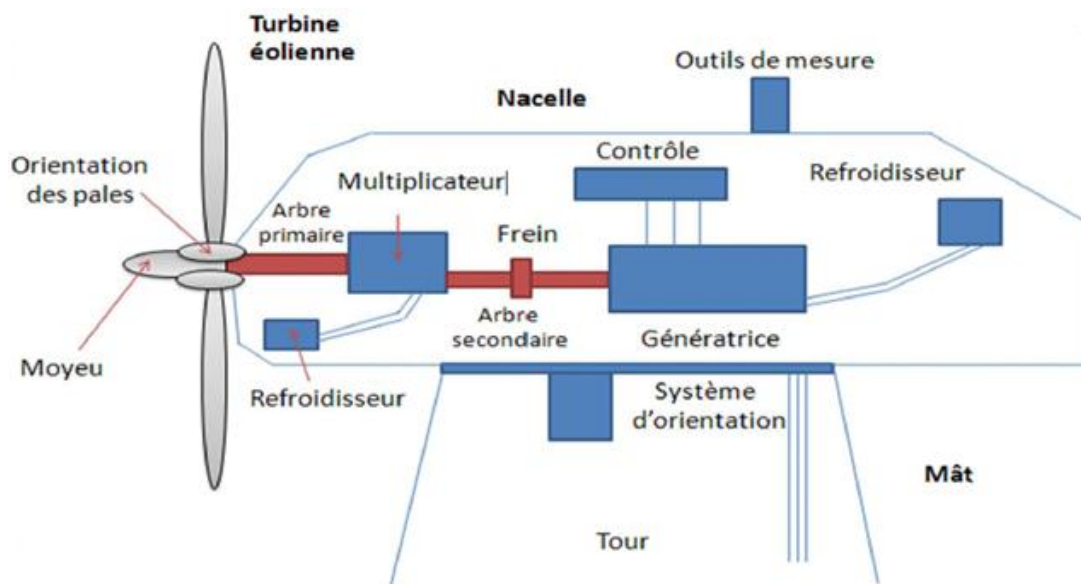


Figure. I.5. Principales composantes d'une turbine éolienne. [3]

I.2.1. Le mât (tour) :

C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique.

Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mât devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle. [5]

I.2.2. La nacelle :

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique (Figure. 1.5). Elle comprend les éléments suivants:

1. Arbre primaire et secondaire.
2. Multiplicateur.
3. Deux refroidisseurs.
4. Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
5. La génératrice qui est dans le cas de ce travail une machine asynchrone à double alimentation.
6. Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

I.2.3. Le rotor :

Formé par les pâles assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pâles varie classiquement de 1 à 3.

Les pâles se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées, actuellement les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone est très utilisée car elle allie légèreté et bonne résistance mécanique [8].

I.2.3.1. Moyeu :

C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse du vent [5].

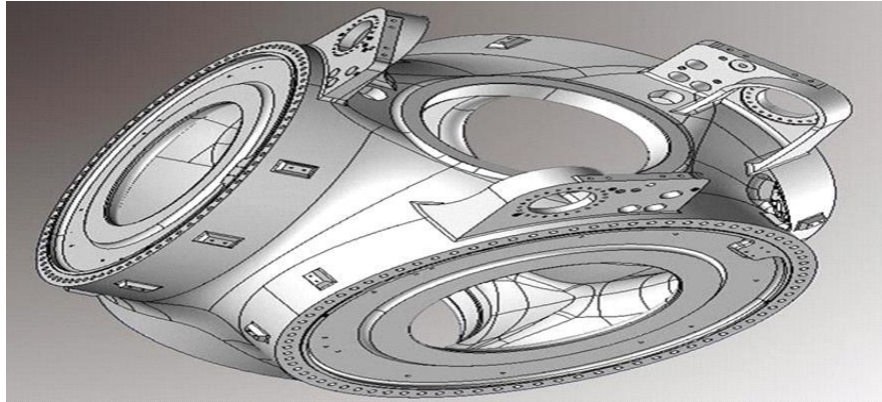


Figure I.6 : Moyeu à 3 pâles [8]

I.2.3.2. Les pâles :

Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pâles dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité. [5]



Figure I.7 : Schéma d'une pôle [8]

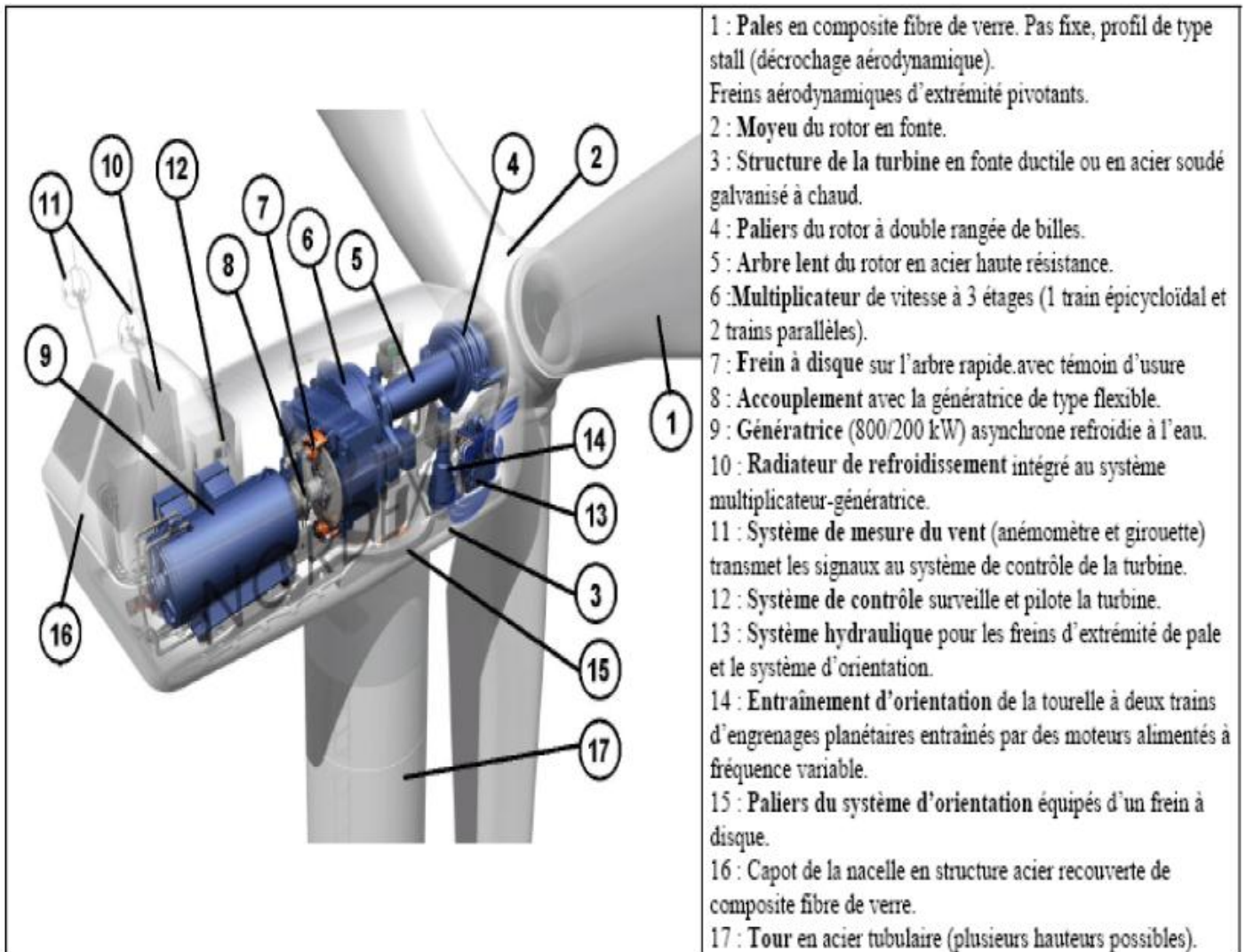


Figure I.8: différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW) [5]

I.3.Chaine de conversion de l'énergie éolienne

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de bases à savoir: [9]

- ✓ Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- ✓ Une transmission mécanique.
- ✓ Une génératrice.
- ✓ Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éolienne :

- ✓ Les éoliennes raccordées au réseau.
- ✓ Les éoliennes autonomes.

I.3.1.Principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 paires de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par le générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât.

Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. [9]

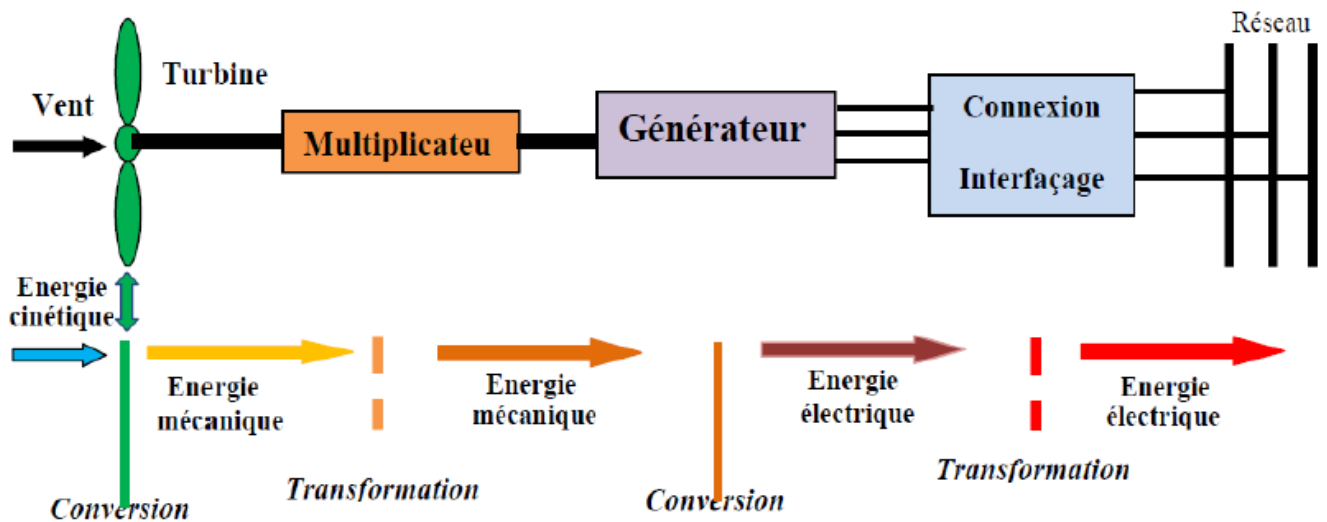


Figure I.9 principale de la conversion de l'énergie éolienne [9]

I.3.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.3.2.1. Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement : [10]

- C'est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques nucléaires.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.

I.3.2.2. Les inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- Le bruit: Il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit

donc être limitée.

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés
- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif. [10]

I.4.Structures du système de conversion de l'énergie éolienne :

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration :

I.4.1.Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écuréuil directement couplée sur le réseau électrique (figure I.10). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control) [11]

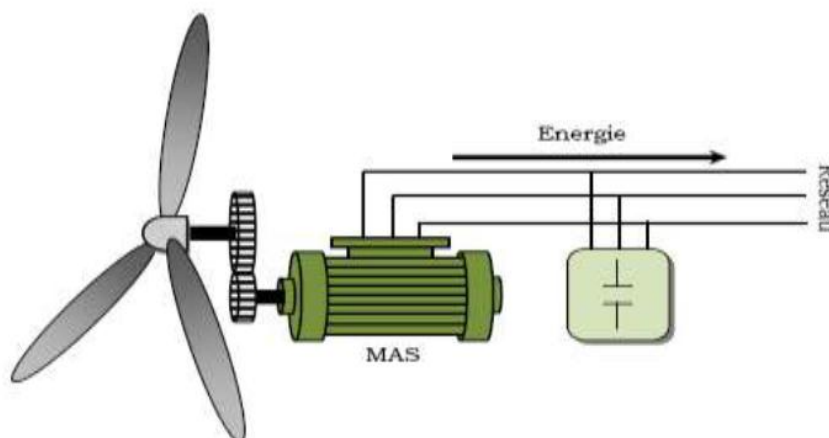


Figure I.10 : éolienne à vitesse fixe. [11]

Parmi ses avantages : [7]

- System de contrôle très simple.
- Aucune interface d'électronique de puissance.
- Utilisation d'une machine standard, robuste et pas chère.

I.4.2.Fonctionnement à vitesse variable :

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique **synchrone** ou **asynchrone**.

Les machines **synchrone** : elles sont utilisées dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

La deuxième catégorie d'éolienne repose sur des machines **asynchrones**. Elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Ces machines tournent à une vitesse beaucoup plus importante que celle de la turbine éolienne d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse. Cette technologie est utilisée pour les fortes puissances. La machine asynchrone peut être alimentée par le stator (machine à cage) ou par le stator et le rotor à la fois (machine à rotor bobiné).

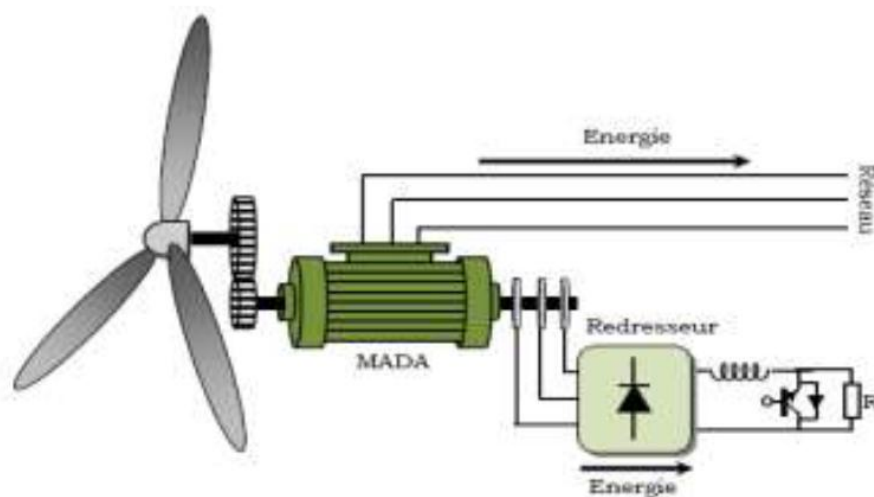


Figure I.11: Système à vitesse variable par dissipation de la puissance rotorique. [11]

Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants : [11]

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (augmentation du rendement énergétique).
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.

I.4.2.1. Machine asynchrone à cage (MAS):

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses.

Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée (Figure 1.12), mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur

toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (Figure 1.13). Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients. [3]

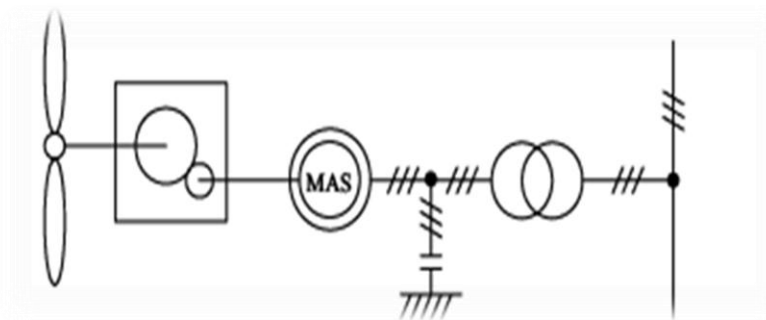


Fig. I.12. Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)
[3]

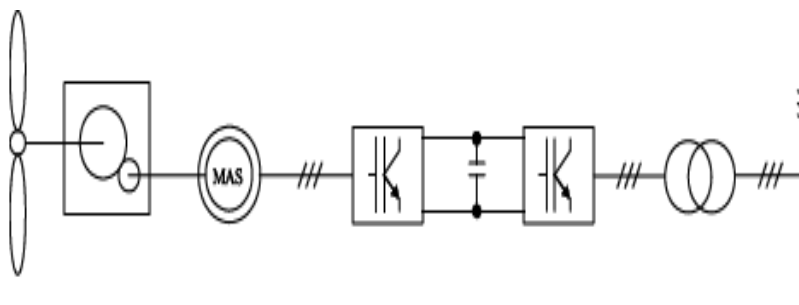


Fig. I.13. Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable[3]

I.4.2.2. Machine asynchrone à double stator :

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I.14)

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

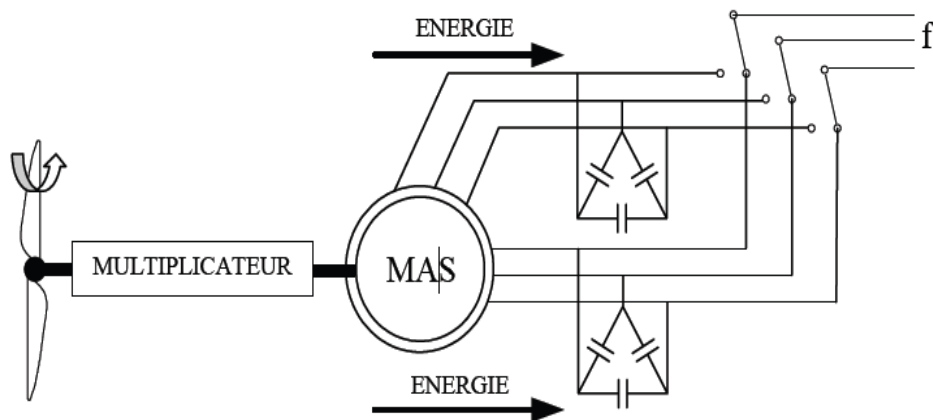


Figure 1-14: Machine asynchrone à double stator [5]

I.4.2.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

Le dispositif de base est représenté sur la Figure 1-15. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance

nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur.

Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif. [4]

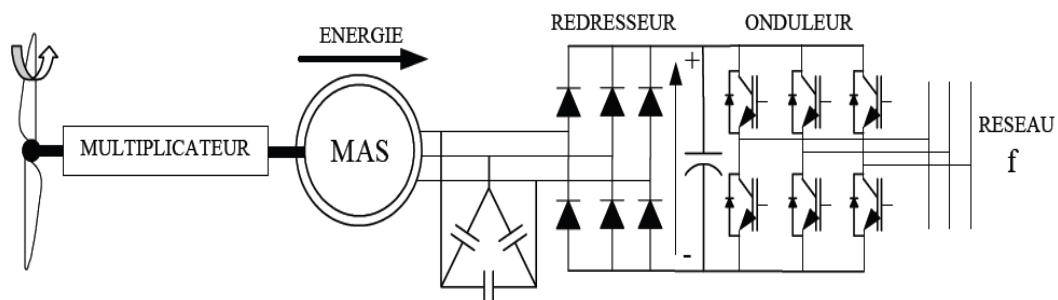


Figure 1-15 : Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur [5]

I.4.2.4. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless" :

Cette machine est à double stator (Figure 1.16). Un bobinage transite la puissance il a une grande section et est directement connecté au réseau. L'autre bobinage est de section moins importante. Il est connecté à un onduleur pour contrôler les flux d'excitation. Le rotor dans cette machine est à cage d'écureuil, cependant il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques. [5]

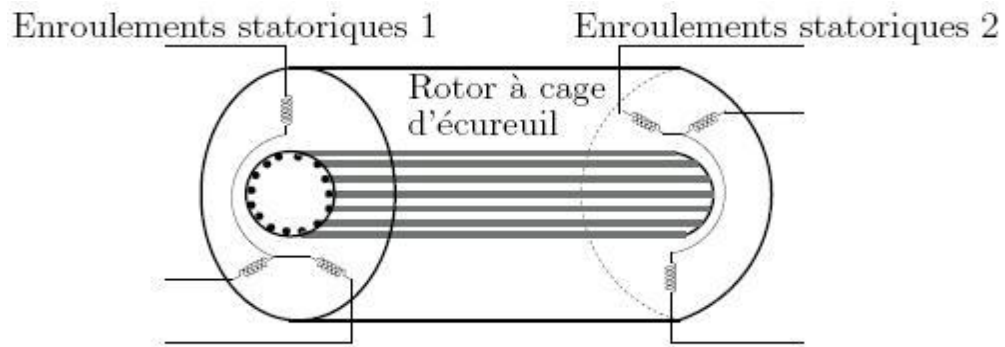


Figure 1.16 -MADA à double stator [7]

Cette machine présente l'intérêt de fonctionner à vitesse variable. Le convertisseur est connecté au bobinage de faible puissance donc moins coûteux. Cependant la machine a un stator plus volumineux et plus complexe à réaliser (Figure 1.17)

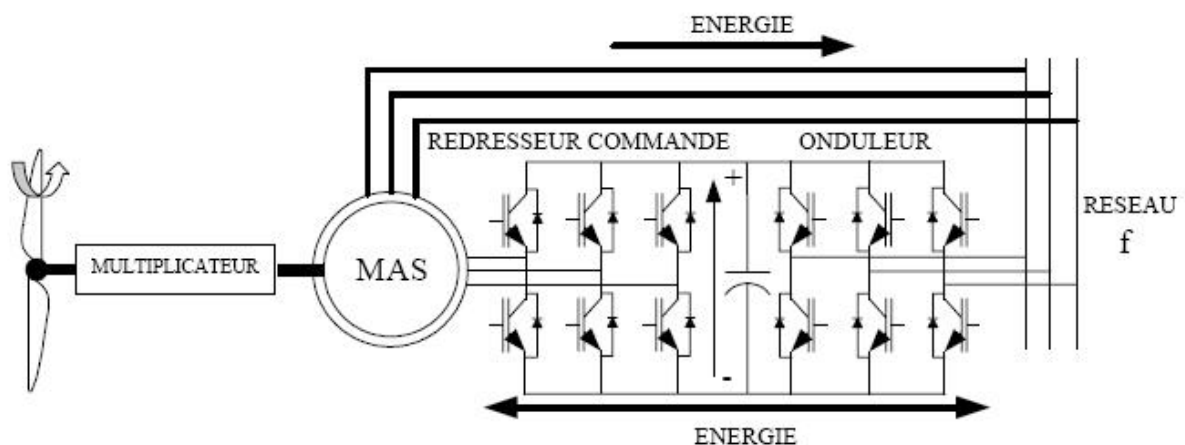


Figure 1-17 : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau. [7]

Le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance ainsi que le courant rotorique d'où l'optimisation du rendement. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum. Cependant si le glissement dépasse une valeur de 30%, le système devient peu attractif à cause de la diminution de rendement et l'augmentation du coût du convertisseur.

I.4.2.5. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné :

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 ci-dessous. 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 compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotorique f_r est égale à 9 fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et d'un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur.

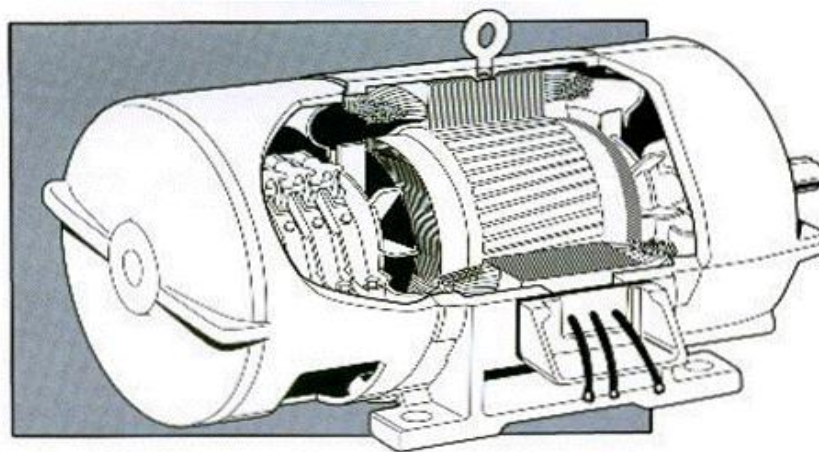


Figure 1-18 : Machine asynchrone à rotor bobiné [4]

I.4.2.5.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure I.19, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive

est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur. [12]

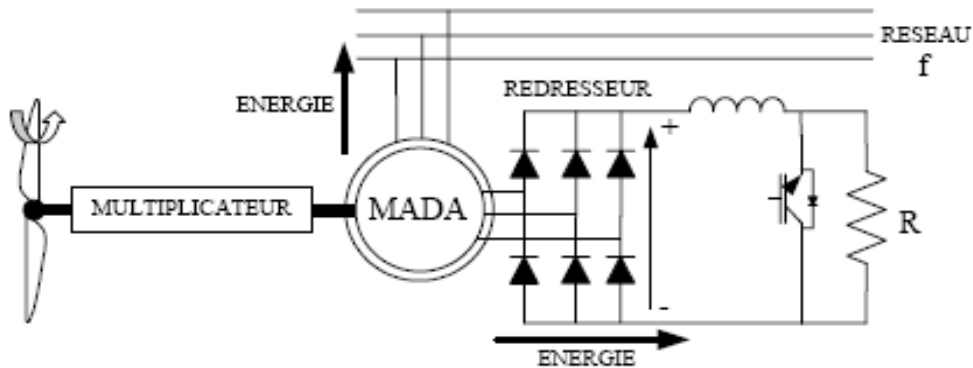


Figure I.19 : MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique [12]

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transisant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

I.4.2.5.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement Vers le réseau (structure de Kramer, Figure. I.20).

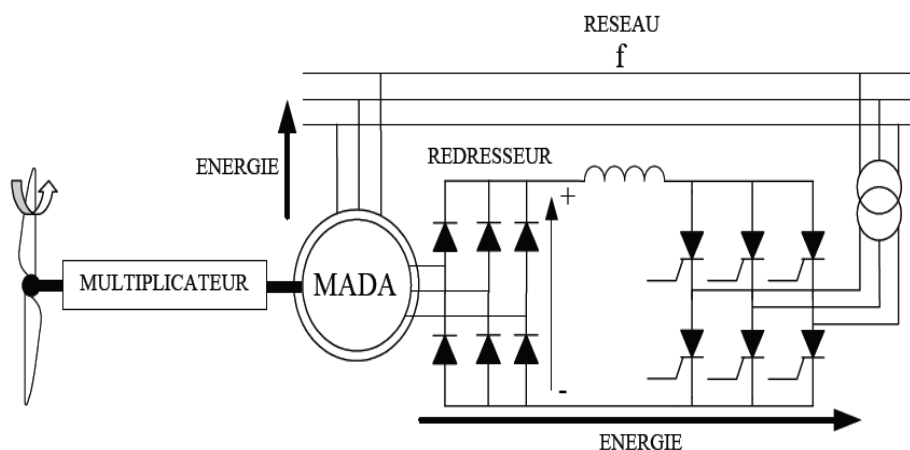


Figure. I.20.MADA structure Kramer [12]

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance ; de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT.

I.4.2.5.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Figure 1.21), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius

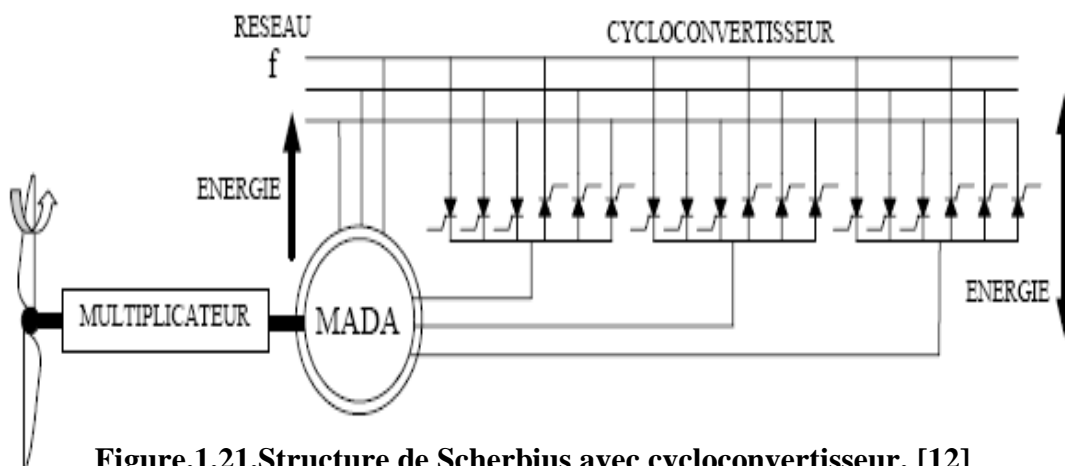


Figure.1.21. Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. [12]

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure 1.21. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

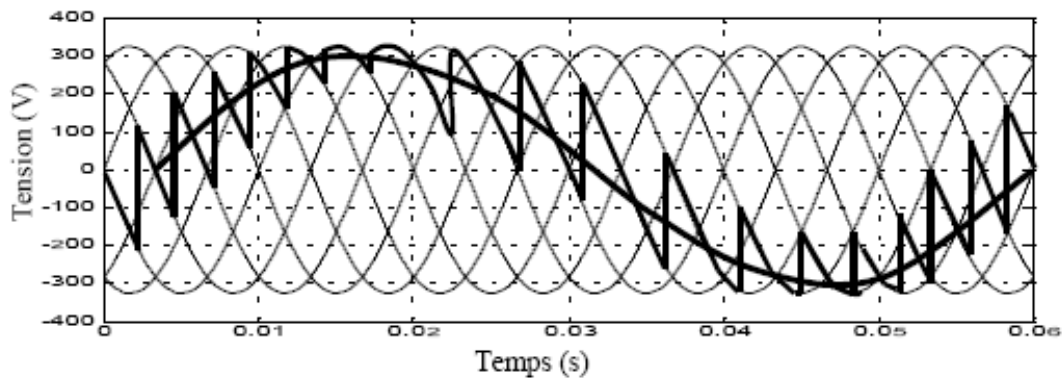


Figure.1.22.Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur. [7]

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure 1.22). Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

I.4.2.5.4. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Cette configuration (Figure 1-23) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO . L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

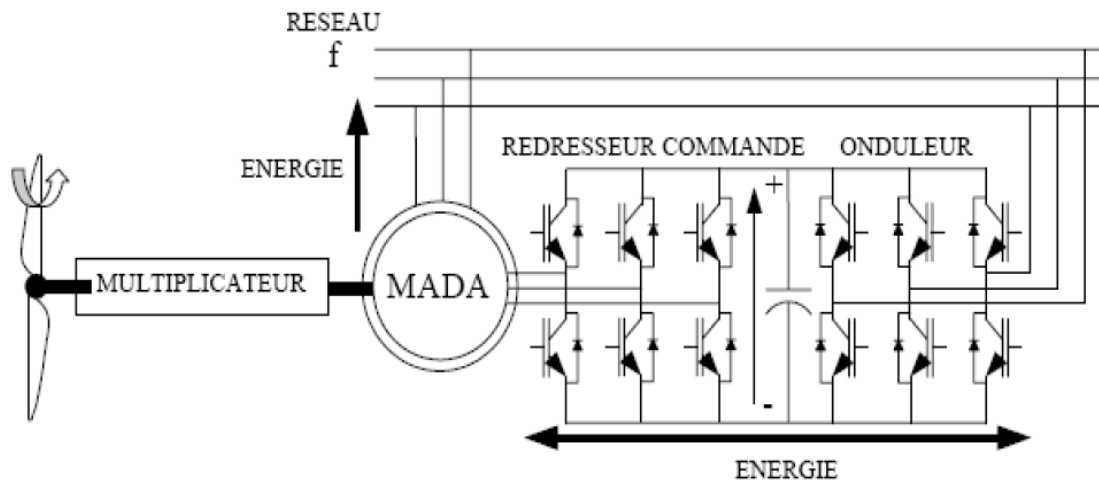


Figure.1.23. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI [7]

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless". Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor). Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau.

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

I.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA :

La machine asynchrone à double alimentation présente des avantages et des inconvénients lors de son fonctionnement à vitesse variable.

I.5.1. Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmenter son rendement.
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- L'alimentation de la machine par deux onduleurs permet de travailler autour de l'arrêt à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété nous assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances.
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.
- La mesure des courants au stator et au rotor, contrairement à la machine à cage, donnent ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La large gamme de vitesse accessible à couple et à flux constant.
- Cette machine peut assurer tous les fonctionnements des autres machines. On peut donc y voir un avantage majeur, elle pourrait permettre de passer d'un fonctionnement à un autre tout à fait acceptable. Par exemple dans une application ferroviaire, nous pouvons revenir à mode de fonctionnement de type machine asynchrone à rotor court-circuité en cas de l'apparition d'un défaut sur l'un des bras des onduleurs. La gestion des modes dégradés est plus facile.

I.5.2. Inconvénients de la MADA :

Parmi les inconvénients apportés par cette machine.

- La machine à bague, dans un milieu corrosif, les bagues peuvent s'oxyder et cela nécessite un entretien particulier. Cependant pour un même

fonctionnement, les moteurs à bagues demandent un entretien moindre que les moteurs à courant continu.

- La machine à double alimentation requiert un collecteur à trois bagues au rotor. Donc pour une même puissance, ce moteur est un peu plus long et à peine plus lourd que le moteur asynchrone à cage équivalent.
- Le rotor et le stator doivent être reliés à l'armoire d'alimentation. Cependant le stator sera généralement connecté par des câbles HT de faible section. L'appareillage est plus important et nécessite un entretien.
- L'aspect multi-convertisseur, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix.

CHAPITRE II :

Diagnostic et défaut de la machine

II.1. Terminologie au diagnostic :

II.1.1. Défaut (*Fault*)

Le concept de défaut est très utile dans les opérations de surveillance et la maintenance des processus industriels. Un défaut concernant une ou plusieurs propriétés du système est toute déviation entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique normale. Il peut être physique (résultant de dysfonctionnements matériels), de conception (résultant d'erreurs commises durant le développement des systèmes), ou/et d'interaction (résultant d'erreurs dans la conduite ou l'utilisation opérationnelle des systèmes, ou dans leur maintenance). Un défaut est donc une anomalie qui n'empêche pas le système de remplir sa fonction, mais il peut aboutir à une défaillance et parfois même à une panne. [13]

II.1.2. Défaillance (*Failure*)

Une défaillance définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique, c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées.

Les défauts incluent les défaillances mais la réciproque n'est pas vraie. Un système peut remplir sa fonction tout en présentant une anomalie de comportement. Par exemple, une machine électrotechnique peut produire un bruit anormal tout en entraînant correctement une charge, en supposant que telle soit sa fonction. Le bruit anormal est un défaut qui peut permettre de présager d'une défaillance à venir. La recherche de défauts est donc fondamentale en diagnostic.

Perte partielle ou totale des fonctionnalités du système qui le rend incapable de délivrer le service pour lequel il a été conçu. [7]

On peut classer les défaillances comme suit :

En fonction des causes :

- **Défaillance due à un mauvais emploi** : Défaillance imputable à la présence de contraintes dépassant les capacités prescrites.

- **Défaillance due à une faiblesse inhérente** : Défaillance imputable à une faiblesse inhérente à l'objet lorsqu'il est exposé à des contraintes n'excédant pas les capacités prescrites.

En fonction du degré :

- **La défaillance partielle** : Elle survient suite à un dysfonctionnement d'un élément ou sous-ensemble d'un équipement. La partie en cause présente une dérive de caractéristiques qui ne conduit pas à l'arrêt complet de l'appareil.
- **La défaillance complète** : C'est le cas où l'appareil ne répond plus à sa fonction première.

Ces défaillances peuvent survenir séparément ou quelques fois ensemble. On détermine aussi d'autres types de défaillance :

- ✓ **La défaillance intermittente** : défaillance d'un dispositif subsistant pendant une durée limitée, à la fin de laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir sa fonction requise, sans avoir été soumis à une action corrective externe quelconque. Une telle défaillance est répétitive.

En fonction des conséquences :

- ✓ **Défaillance mineure** : dans laquelle seule la commande est se paramétrée pour utiliser les degrés de liberté existant, elle ne provoque qu'un arrêt de production faible et aucune dégradation notable.
- ✓ **Défaillance majeure**: quand la préparation des ressources est nécessaire en préliminaire à leur utilisation pour l'exécution des opérations bloquées par la panne.
- ✓ **Défaillance moyenne** : nécessitant une remise en état ou une petite réparation.
- ✓ **Défaillance significative** : dans laquelle des ressources sont réaffectées pour exécuter les opérations bloquées par la panne.
- ✓ **Défaillance critique** : nécessite une intervention d'urgence.
- ✓ **Défaillance très critique** : nécessitant une grande intervention.
- ✓ **Défaillance catastrophique** : impliquant des problèmes de sécurité et/ou une production non-conforme.

En fonction de la vitesse d'apparition :

- ✚ **La défaillance soudaine** : Elle peut intervenir à n'importe quel moment et peut être due à des agents extérieurs tels que : la surtension sur le réseau d'alimentation, et la foudre. C'est une défaillance imprévisible même lorsque la maintenance préventive est respectée.
- ✚ **La défaillance progressive** : Elle est due suite à une négligence dans le processus d'entretien des équipements. Elle est prévisible si un examen antérieur est effectué.

C'est le cas par exemple de la baisse du niveau de l'électrolyte dans une batterie d'accumulateurs.

En fonction de la vitesse d'apparition et du degré :

❖ **La défaillance catalectique** : C'est la combinaison d'une défaillance soudaine et d'une défaillance complète. Elle est soudaine et complète.

❖ **La défaillance par dégradation** : Elle est en même temps progressive et partielle. Elle survient après l'usure de pièces telles que les courroies et les roulements à billes.

En fonction du taux de défaillance avec le temps :

- Défaillance précoce : ou défaillance en rodage, apparait dans la période de rodage qui se caractérise par un fort taux de défaillance.
- **Défaillance aléatoire** : représente la durée de vie utile, où le taux de défaillance est quasiment constant, et c'est la période la plus intéressante, puisque les défaillances sont entièrement aléatoires, c'est à dire dues entièrement au hasard. Le taux de défaillance sur cette période permet d'établir des prévisions sur la fiabilité, par le biais de la théorie des probabilités.
- **Défaillance par usure** : au delà de la durée de vie utile, vient la période d'usure qui se caractérise par l'augmentation progressive du taux de défaillance avec le temps suite aux vieillissements des dispositifs.

En fonction des caractéristiques externes des défaillances :

- **Défaillance statique** : le système produit un résultat non correct de manière permanente (aspects fonctionnels).
- **Défaillance dynamique** : le système a un régime transitoire pendant lequel le système produit un résultat faux puis atteint un régime permanent durant lequel les sorties sont correctes (aspects temporels).
- **Défaillance durable** : le système produit des résultats erronés de manière persistante.
- **Défaillance transitoire** : délai de réponse à un événement infini.
- **Défaillance cohérente ou incohérente** : suivant que la perception de la défaillance est identique pour les utilisateurs ou non.

II.1.3. Panne : (*Break-down*)

La panne causant de l'apparition de symptômes est le résultat d'une défaillance affectant le système, aboutissant à une inaptitude permanente ou intermittente à remplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation et pouvant provoquer son arrêt complet ou

intermittent. Donc, la panne peut être permanente nécessitant une action de réparation indispensable, comme elle peut être intermittente étant le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système. Le système dans ce cas peut retrouver son fonctionnement nominal après la présence de la panne. Cependant, sans réparation, la dégradation partielle ou progressive d'un composant du système peut aboutir à une panne permanente. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance et on distingue les classes de pannes suivantes :

- ❖ Panne de capteur : dégradation d'une caractéristique des blocs de capteurs (biais, dérive,...) d'où la transmission des mesures erronées.
- ❖ Panne de processus : détérioration des paramètres : fuites, rupture des organes....
- ❖ Panne d'actionneur : fourniture de valeurs de commande erronées, et possibilité d'avoir une rupture ou un blocage d'actionneur. Aussi, une panne peut être :
- ❖ Panne intermittente : panne d'un dispositif subsistant sur une durée déterminée et limitée. Après cette durée le dispositif est apte à assurer la fonction ou la mission pour laquelle il a été conçu sans avoir fait l'objet d'une action corrective.

En pratique, ce sont les défauts les plus difficiles à diagnostiquer.

- ❖ Panne fugitive : panne d'un dispositif qui est intermittente et difficilement observable. Ils sont extrêmement difficiles à diagnostiquer car leur apparition est de nature aléatoire.
- ❖ Panne permanente : panne d'un dispositif qui subsiste tant qu'une opération de maintenance corrective n'a pas été effectuée.
- ❖ Panne latente ou cachée : panne d'un dispositif qui existe mais qui n'a pas été détectée.

II.1.4. Symptôme (Symptom):

Caractère distinctif d'un état fonctionnel anormal.

II.1.5. Résidu (Résiduel) :

Souvent, lorsque le modèle comportemental de référence est analytique, les signaux porteurs de signes ou de symptômes sont appelés résidus parce qu'ils résultent d'une comparaison entre un comportement réel et un comportement de référence.

II.1.6. Diagnostic :

Un diagnostic est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Habituellement, le diagnostic est exprimé par les états des composants ou les états des relations de description du comportement.

II.1.7. Perturbation :

La perturbation est l'entrée secondaire non principale d'un système physique, qui n'est pas une commande. Autrement dit, c'est une entrée non contrôlée. La figure (II.1) représente les anomalies suivant leur criticité. Il existe également une criticité croissante entre défaillance et panne. De la non conformité (ou anomalie) dans le cas d'une défaillance, on passe à une inaptitude à accomplir une fonction dans le cas d'une panne. [6]

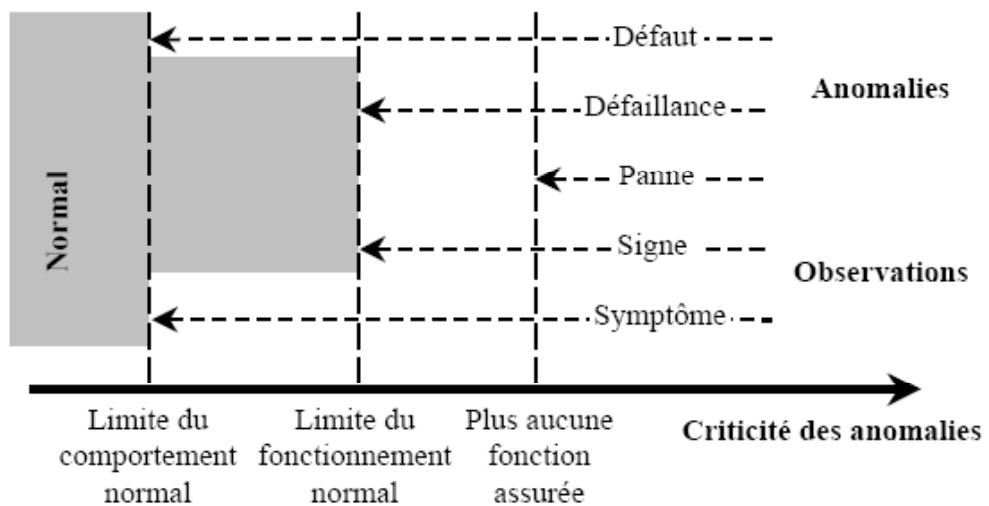


Figure. II.1. Anomalies et Observations classées par criticité croissante. [6]

II.2. Notion de diagnostic d'un système

En grec le mot *diagnostic*, désigne l'identification d'une maladie par ses symptômes. Alors, le diagnostic d'un système physique est l'identification du mode de fonctionnement à chaque instant, par ses manifestations extérieures [14]. L'action de diagnostic consiste à identifier les causes probables des défaillances ou l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres significatifs de dégradations à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information. Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier l'hypothèse faite sur l'origine et la cause des défaillances, et de préciser les opérations à prendre.

Nous nous intéressons spécifiquement au principe de diagnostic d'un système, les différentes approches de diagnostic, les défauts dans les machines tournantes et le diagnostic des machines électriques.

II.2.1. Procédures de diagnostic

Dans la procédure de diagnostic, on distingue deux étapes principales : *la détection* et *la localisation* des défauts et en plus *l'identification* dans certaines méthodes.

En pratique, dans un équipement industriel, lorsqu'un défaut apparaît le système de diagnostic détecte l'anomalie puis identifie les causes pour qu'il puisse être isolé.

L'organisation de la procédure de diagnostic de défaut(s) d'un système est la suivante [14] :

- Extraction des informations nécessaires,
- Elaboration des signatures associées aux symptômes des défauts,
- Détection de dysfonctionnements,
- Mise en œuvre de la méthode de diagnostic,
- Interprétation des données,
- Prise de décision en fonction des conséquences et de l'importance des défauts.

II.2.2. Types de défauts

Une modification suffisamment importante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant peut être la conséquence de défauts et un défaut est une cause probable d'erreur pour un fonctionnement donné. Le système défaillant est incapable d'accomplir correctement sa ou ses fonction(s) avec les performances requises et les défauts apparaissent dans différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation, définissant alors les différents types de défauts :

- les défauts actionneurs
- les défauts procédés
- les défauts capteurs

II.2.2.1. Défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent la perte totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire en régime normal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une dégradation de fonctionnement par rapport au fonctionnement sain.

II.2.2.2. Défauts procédés

Ce type de défaut provient du système lui-même, souvent les défauts n'appartiennent pas à un défaut capteur ou actionneur. Un défaut procédé résulte de la casse d'un composant du système et réduit les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit.

II.2.2.3. Défauts capteurs

Le défaut capteur engendre une mauvaise image de l'état physique du système. Il existe deux types de défauts capteurs qui sont le défaut capteur partiel et le défaut capteur total. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ce défaut peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie. Et le défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer.

II.2.3. Approches de diagnostic

Des nombreuses approches ont été utilisées pour le diagnostic de système en défaut. Parmi les différentes méthodes, on distingue deux familles principales :

- La première famille utilise le modèle mathématique du système à surveiller, et est employée généralement dans les domaines de l'automatisme. Souvent la méthode est appelée « méthode avec modèle »,

- La deuxième famille utilise les données acquises sur les systèmes, l'observation des données avant et après la prise en considération des anomalies permet de caractériser le mode de fonctionnement, appelée aussi « méthode sans modèle à priori ».

Ces deux familles d'approches de diagnostic ont deux sous familles ; celles utilisant le modèle qualitatif et celles faisant appel au modèle quantitatif. Les deux modèles nécessitent une phase d'apprentissage qui permet de connaître un seuil de fonctionnement sain et défaillant.

Ce seuil permet de générer les symptômes lors de la phase de diagnostic. La figure II.2 suivante présente les différentes méthodes de diagnostic sus mentionnées:

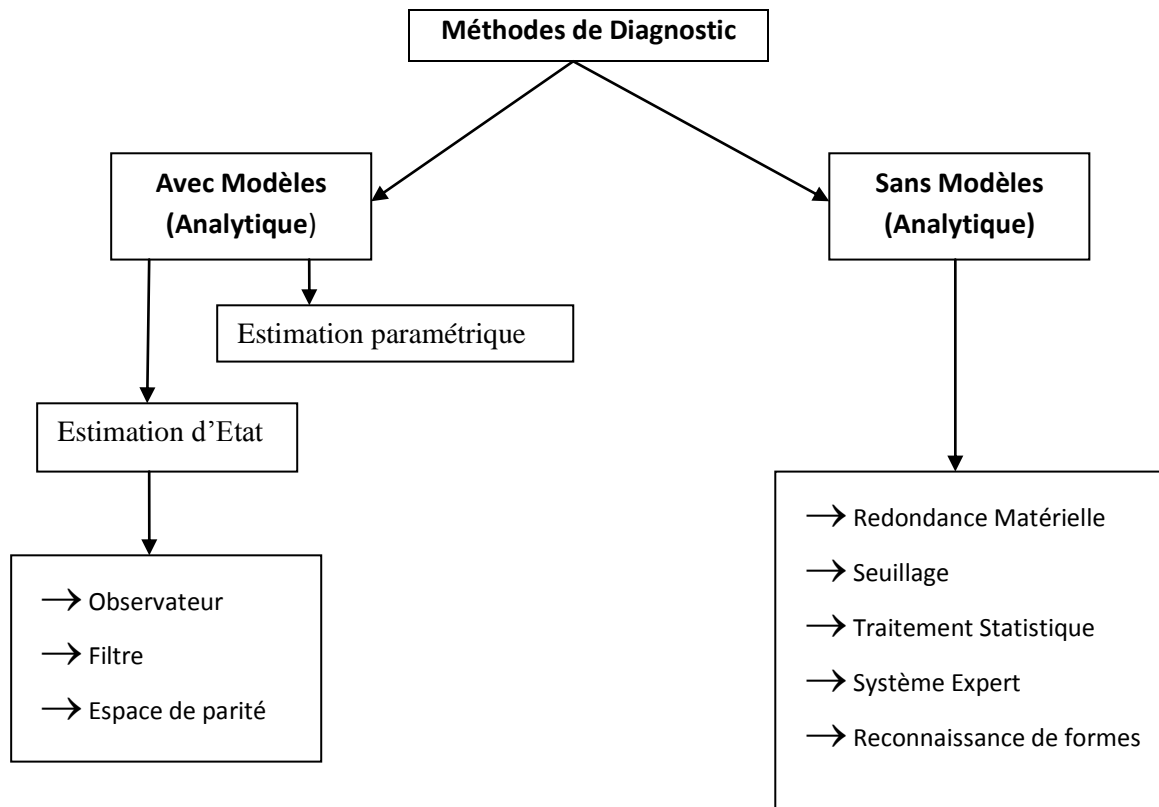


Figure. II.2 : Différentes méthodes de diagnostic [14]

II.2.3.1. Principe de l'approche qualitative

Le principe de cette approche est basé sur l'utilisation des techniques informatiques, relevant de l'intelligence artificielle, exprimée avec des symboles, traitée et simulée avec un raisonnement logique humain. Au milieu des années 1980, pour construire des représentations qui permettent une meilleure compréhension des phénomènes physiques, l'intelligence artificielle s'intéresse au raisonnement qualitatif.

II.2.3.2. Principe de l'approche quantitative

Cette approche très largement répandue utilise le modèle mathématique pour le diagnostic. Elle est basée sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé « indicateur de défaut » ou « résidu ». Le résidu est un signal qui permet d'identifier la présence ou non de défauts des systèmes et qui reflète la cohérence des données mesurées par rapport au modèle comportementale du système. Les modèles utilisés peuvent être très complexes, à temps continu ou temps discret, linéaires ou non linéaires.

II.2.3.3. Diagnostic à base de modèles

Le diagnostic à base de modèles consiste à étudier les contraintes liant les différentes variables du système. Ces relations peuvent souvent être sous la forme de relations analytiques liant les variables connues. Les diagnostics à base de modèle sont :

- **Redondance analytique** : consiste à utiliser des informations supplémentaires du modèle permettant l'élaboration de grandeurs de même nature que celles issus des capteurs.

Dans cette méthode, on remplace les capteurs physiques par des capteurs informationnels. L'idée de base est de comparer le comportement observé et le comportement attendu. Si le comportement observé ne vérifie pas les équations du modèle alors on en déduit que le système ne fonctionne pas normalement.

- **Estimation paramétrique** : supposent l'existence d'un modèle paramétrique décrivant le comportement du système et la connaissance des paramètres en fonctionnement nominal.

La méthode consiste à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir des mesures des entrées et sorties du système. Avec cette méthode la détection d'apparition de défaut s'effectue par comparaison entre les paramètres théoriques et ceux estimés.

- **Observateur** : reposant sur l'estimation d'état, il est parmi les méthodes les plus utilisées pour la génération de résidus. Le vecteur résidu est obtenu en faisant la différence entre le vecteur de sortie du système réel et le vecteur de sortie estimé. Les observateurs s'adressent à un contexte déterministe. L'observateur d'ordre réduit ne considère qu'une partie du système ; par conséquent on n'estime qu'une partie de l'état et on élimine l'autre. On peut utiliser l'élimination d'une partie de l'état pour rejeter les perturbations, l'observateur à entrées inconnues utilise ce principe.

- **Filtre** : utilise une formulation similaire au problème d'estimation et s'appuie sur des modèles stochastiques. Le plus connu est celui de Kalman. L'objectif de ce filtre est d'obtenir un estimateur non-biaisé et une variance de l'erreur d'estimation minimale.

- **Espace de parité** : une des premières méthodes employées à des fins de détection et localisation des défauts (*Fault Detection and Isolation*, FDI). Le principe de cette méthode est la vérification de la consistance existant entre les entrées et les sorties du système surveillé.

L'espace de parité est utilisé sur des systèmes linéaires mais est inexploitable sur ceux non linéaires.

II.2.3.4. Diagnostic sans modèle à priori

Les méthodes se basent sur les informations issues d'une expérience préalable, des règles heuristiques ou des exemples de résolution de défaillances déjà apparues sur des cas similaires. La méthode est appelée aussi « méthode à base de données historiques ». On peut exploiter aussi les lois physiques décrivant le comportement attendu du système. L'écart entre le fonctionnement sain et le fonctionnement défaillant permet de considérer la présence de symptômes d'une panne.

Les méthodes de diagnostic de défauts sans modèle sont les suivantes :

- **Redondance matérielle** : consiste à multiplier le nombre de capteurs, actionneurs, processeurs critiques sur l'installation. Le traitement des signaux redondants issus de ses matériels permet de distinguer l'élément défaillant en cas d'incohérence. Cette méthode se limite à la surveillance des éléments redondants. La méthode est très coûteuse suite aux puissances consommées, aux poids et aux achats des capteurs et aussi en maintenance. L'inconvénient majeur de la redondance physique, est qu'elle ne détecte pas des pannes venant des éléments non redondants.

- **Seuillage** : consiste à comparer les variables mesurées avec des limites constantes ou adaptatives. Le premier niveau de comparaison indique la présence probable de défauts et le second caractérise leur gravité. Si les signaux franchissent le seuil, ceci représente la présence d'anomalie. L'inconvénient de cette méthode est son aspect catégorique. Le résultat issu de cette méthode peut être remis en question si la grandeur testée est proche du seuil à cause du bruit. Celle-ci peut être considérée comme un défaut alors que c'est seulement une fausse alarme.

- **Traitement statistique** : dans cette méthode on peut détecter la présence ou non de défaillance en analysant l'évolution de la moyenne ou de la variance d'un signal. Le test d'hypothèse ou des hypothèses représentant le fonctionnement sain et le fonctionnement défaillant du système permet d'effectuer la prise de décision. Le test d'hypothèse le plus utilisé et le plus connu est celui de Willsky [WILL76] et [VELL06] basé sur le maximum de vraisemblance généralisée et minimiser le nombre d'observations nécessaires à la prise de décision.

- **Modèle de connaissance** : pour avoir le modèle de connaissance, on peut exploiter la connaissance heuristique du domaine. On peut collecter les données des experts humains pour formaliser le principe, souvent exprimé sous forme qualitative. Le modèle de connaissance est

proche des méthodes utilisées par les humains. Dans la littérature on trouve deux modèles de connaissance :

- *Les systèmes experts* qui modélisent l'expertise et les capacités des spécialistes dans le domaine.
- *Le raisonnement à partir de cas* est un raisonnement qui résout le problème à partir des expériences passées. Dans ce cas les connaissances sont conservées sous forme de cas. C'est un raisonnement par analogie. L'inconvénient de ce modèle consiste à la détermination des cas nécessaires pour décrire l'état du système.

- *Reconnaissance de forme* : l'approche consiste à modéliser le mode de fonctionnement par la méthode analytique, mais avec des ensembles de mesures. La méthode est présentée comme l'alternative à l'approche avec modèle.

II.3. Différentes défaillances dans les systèmes éoliens

Les turbines éoliennes sont soumises à des conditions de service extrêmement variées qui peuvent, dans certains cas, pousser les diverses parties du système éolien au-delà de leurs limites. En conséquence, les statistiques des défaillances pouvant affecter les turbines éoliennes devraient être étudiées en tenant compte de deux critères, leurs fréquences et leurs temps d'arrêt provoqués, afin d'en déduire les défaillances à prendre prioritairement en compte dans un contexte de maintenance prédictive. Cependant, l'accès à ces statistiques n'est pas toujours autorisé par le fabricant et il est tout à fait compréhensible.

Des analyses des données réelles de défaillances dans les turbines éoliennes ont montré les composants principaux d'un système éoliens qui sont concernés par l'analyse de défaillance.

La figure(II.3) montre une analyse réelle considérant les fréquences et les temps d'arrêt résultant de défaillance pour les centrales éoliennes suédoises sur la période 2000-2004. [13]

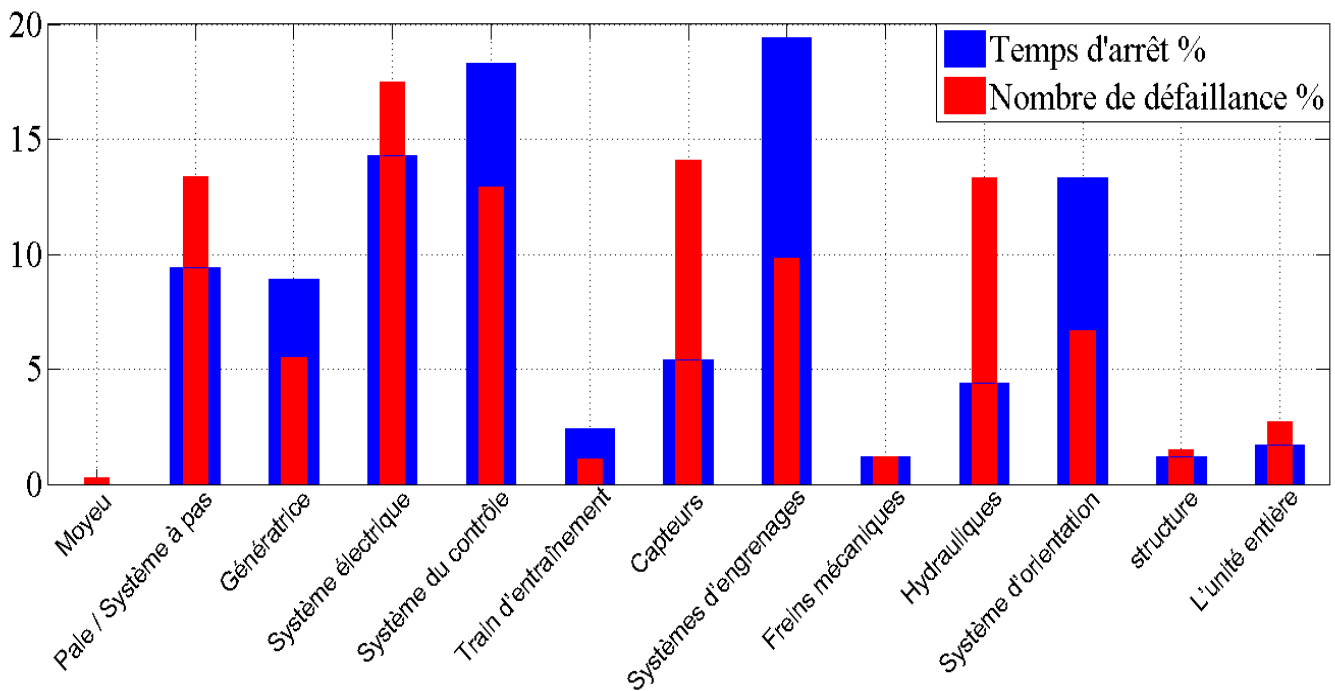


Figure. II.3. Les distributions de nombre de défaillances en comparant avec les temps d'arrêt par composant pour les centrales éoliennes suédoises sur la période 2000-2004[13]

La distribution des défaillances et des temps d'arrêt pour chaque composant des systèmes éoliens sont comparés et il est clair que la plupart des défaillances sont liées au système électrique, les différents capteurs, le système d'orientation des pales et le système de contrôle respectivement. Cependant, pour le temps d'arrêt correspond à chaque composante, la boîte de vitesses et le système de commande ont le taux le plus élevé par rapport aux autres composantes.

Une autre étude, au sujet des systèmes éoliens suédois et Allemagne pour deux centrales pendant la période 1994-2004, montre la même tendance. En allemand, les taux de défaillance les plus élevés sont dans le système du contrôle électrique ou les montages partiels du système électrique (réseau ou système électrique, système d'orientation de la nacelle et système mécanique ou d'orientation des pales) que dans les montages partiels mécaniques tels que la boîte de vitesses.

Le nombre de défaillances par année d'exploitation est un autre facteur très important dans les statistiques de défaillance pour les chaînes éoliennes. Figure(II.4) montre le nombre de turbines éoliennes qui ont « survécu » en fonction des années opérationnelles respectives ainsi que les nombres de défaillances jusqu'à 19 ans d'opération ont été enregistrés.

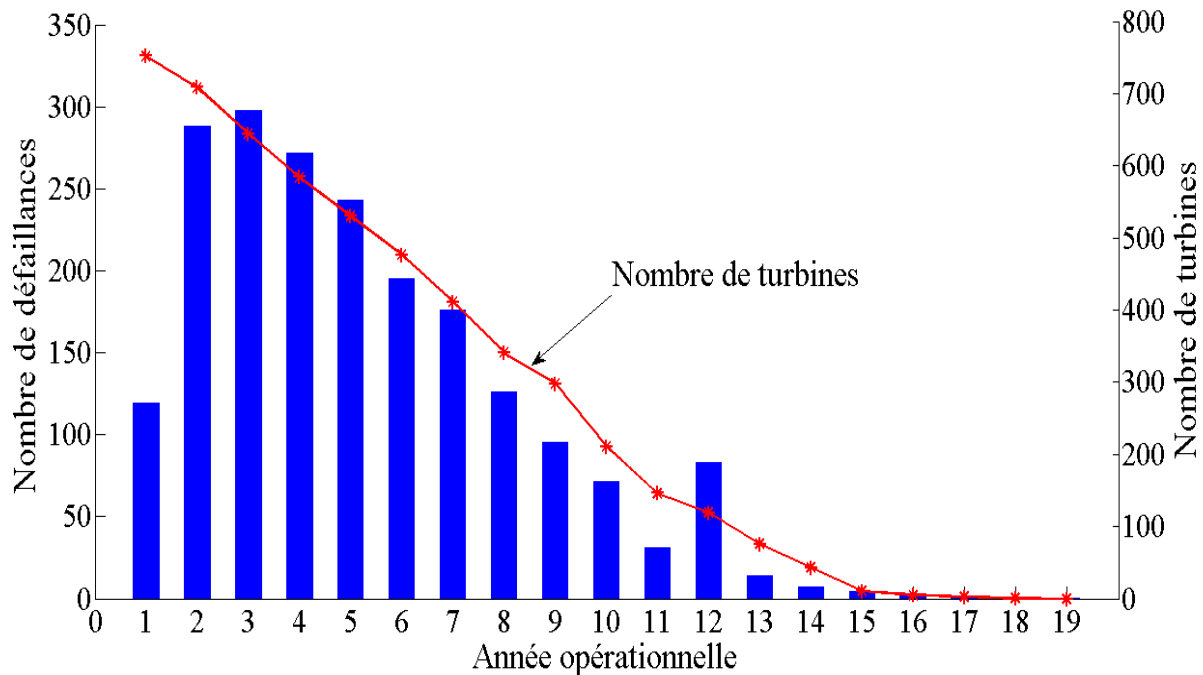


Figure II.4. Nombre de défaillances en fonction de l'année d'opération [13]

Le nombre de défaillances dans la première année de fonctionnement est beaucoup plus faible que dans la seconde. Ensuite, le taux de défaillance reste presque constant depuis la huitième année d'exploitation et tombe à 11 ans d'exploitation. Ensuite, aux 12^{ème} année d'exploitation, il donne un pic important en diminuant vers le bas jusqu'à la 19^{ème} année.

Bien que la boîte de vitesses soit la partie la plus critique pour les applications éoliennes d'entraînement indirect, il peut être supposé que les applications d'entraînement direct ont moins de défaillances que les autres. Néanmoins, une étude sur les différents types d'éoliennes montre que les applications éoliennes à entraînements directs n'ont pas moins de défaillances que les applications éoliennes à entraînements indirects. Une recherche liée à la fiabilité des générateurs et des convertisseurs électronique de puissance dans les systèmes d'énergie éolienne a été faite dans et elle établit que (figure II.5) :

- Les défaillances de convertisseur de puissance dans les applications éoliennes à entraînements directs sont plus importantes que dans les applications éoliennes à entraînements indirects, mais elles sont beaucoup plus petites que la boîte de vitesses.
- Le taux de la défaillance du système électrique est remarquable dans les entraînements directs prenant en considération l'ensemble de tous les défauts de connexion électrique, leur

taux de défaillance est beaucoup plus important que le taux de défaillance de la boîte de vitesses en entraînement indirect.

- Les taux des défaillances des générateurs à entraînement direct sont deux fois de plus que dans des applications à entraînements indirects.

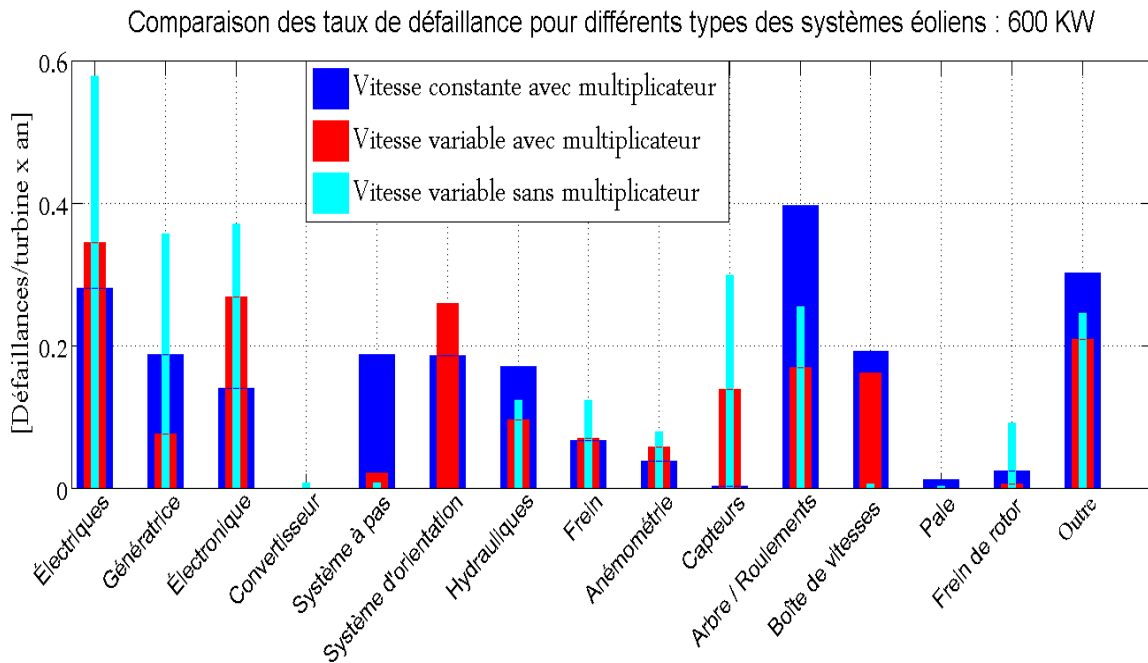


Figure II.5. Comparaison des taux de défaillance pour différents types des systèmes éoliens [13]

Par conséquent, le taux total de défaillance dans les applications éoliennes à entraînements directs n'est pas inférieur aux applications éoliennes à entraînements indirects. Une comparaison complète de l'entraînement direct et indirect des systèmes éoliens a été faite dans en fonction de leur coût et de leur efficacité énergétique annuelle.

Résultats	Suède	Finlande	Allemagne
Nombre moyen de défaillances par turbine	0.402 fois par année	1.38 fois par année	2.38 fois par année (1.86 fois par année pour 2004-2005)
Temps d'arrêt moyen par an	52 heures par an	237 heures par an	149 heures par an
Temps d'arrêt moyen par défaillance	170 heures par défaillance	172 heures par défaillance	62.6 heures par défaillance
La plupart de défaillances	1. Système électrique 2. Capteurs 3. Pale / Système à pas	1. Hydrauliques 2. Pale / Système à pas 3. Boite de vitesses	1. Système électrique 2. Système de commande 3. Hydrauliques, capteurs
La plupart de temps d'arrêt	1. Boite de vitesses 2. Système de commande 3. Système électrique	1. Boite de vitesses 2. Système de commande 3. Système électrique	1. Boite de vitesses 2. Train d'entraînement 3. Génératrices
le plus long temps d'arrêt par défaillance	1. Train d'entraînement 2. Système d'orientation 3. Boite de vitesses	1. Boite de vitesses 2. Pale / Système à pas 3. Structure	1. Génératrices 2. Boite de vitesses 3. Train d'entraînement

Tableau 1 : Résultats d'un aperçu sur des défaillances [13]

Le tableau 1 montre un aperçu sur des statistiques pour l'industrie d'énergie éolienne dans la Suède, la Finlande et Allemagne. Les résultats de la recherche ont remarqué comment les défaillances dans les génératrices sont critiques en fonction des taux de défaillance et des temps d'arrêt moyens. Une autre conclusion importante dans cette recherche est que les

grandes turbines éoliennes ont une fréquence plus élevée des défaillances comparativement aux petites et plus anciennes turbines éoliennes.

II.3.1. Les défaillances du contrôle électrique

Les détériorations des enroulements du générateur électrique, des transformateurs et de câblage ainsi que les courts-circuits et les surtensions de composants électroniques sont les défaillances communes de contrôle électrique. Ces défaillances peuvent être causées par un des problèmes suivants : des foudres, les mauvaises installations électriques, des défauts techniques et des résonances au sein des circuits Résistance-Condensateur (RC).

II.3.2. Les défaillances du système d'orientation.

Le système d'orientation permet de contrôler la rotation de la nacelle face au vent. Il a été rapporté que les fissures des arbres d'entraînement du système d'orientation, fracture de dents d'engrenage, piqûre de la bague de roulement de moyeu et de la défaillance de la vis fixation de palier sont toutes classés comme des défaillances du système d'orientation. Problème du glaçage dans des conditions météorologiques extrêmes et le niveau de vibration élevé en surcharge sont les causes majeures de la défaillance.

II.3.3. Les défaillances de la boîte de vitesses

La boîte de vitesses est une partie essentielle dans la majorité des turbines éoliennes. Cependant, il a été l'un des composants de la turbine éolienne les plus fréquemment endommagés. Les défaillances portent couramment les jeux entre dents et ruptures des dents. Ils sont revendiqués comme les résultats de contaminations de particules, arrêt/démarrage trop fréquent et les conditions de fonctionnement à forte charge.

II.3.4. Les défaillances du réseau

La grande variabilité de la force exercée par le vent en direction et en intensité est impossible à prévoir avec précision. Sans stockage d'énergie de secours ou tout autre système de production d'électricité, les défaillances du réseau peuvent se produire lors d'une consommation élevée de puissance avec une faible production d'énergie éolienne.

II.3.5. Les défaillances hydrauliques

Les composants hydrauliques sont utilisés dans nombreuses connexions à haute pression. Ils sont situés au système à pas, système d'orientation de la nacelle, le système de freinage et le système de lubrification de la boîte de vitesses. Les fuites dans ces composants sont appelés panne hydraulique. Les éoliennes sont généralement situées dans des conditions environnementales extrêmes comme la haute/basse température, corrosion et vibration. En conséquence, la défaillance peut se produire à cause d'une mauvaise installation, une mauvaise conception du système, une mauvaise qualité des composants et abus du système.

La mauvaise installation est évaluée en tant que 60% de toutes les causes de défaillance, cependant, les défaillances causées par des capteurs défectueux ou par des événements qui ne sont pas d'origine hydraulique sont les causes les plus complexes à identifier et à traiter. En effet, l'application de ces procédures peut parfois prêter à confusion et des problèmes d'interprétation pouvant conduire à des situations non prévues par le constructeur.

II.3.6. Les défaillances des pales

Les pales sont la partie principale dans les rotors des turbines éoliennes transférant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission.

Elles sont, d'une part, constituées de matériaux composites qui peuvent souvent cacher des défauts mineurs ou des mauvais fonctionnements qui sont difficiles à détecter avec les méthodes conventionnelles, et d'autre part, souvent disposées aux phénomènes naturels extrêmes comme les turbulents du vent et les foudres .

Ces derniers peuvent être les causes des défauts dans les matériaux des pales d'éoliennes comme le système de sécurité par vent violent (survitesse de la machine amenant rapidement des contraintes inacceptables au sein des pales et de leur fixation au moyeu) provoquant des défaillances catastrophiques(détérioration, des fissures, des courbures, la perte de tout ou partie d'une pale), mettant en danger des vies humaines et réduisant la confiance du public, ce qui peut freiner leur production. à rapporté qu'une pale brisée avait déplacé aussi loin que 1,3 km de sa tour.

De nombreux pays, par conséquent, mis en place des règlements pour interdire à leurs civils de se rapprocher de parcs éoliens tels que les Etats-Unis et l'Allemagne. La plupart des turbines éoliennes modernes sont équipées d'un système de protection contre la foudre qui est relié au système de commande et de surveillance de la turbine éolienne. Cependant, une protection complète contre ses dommages n'est pas réalisable et par conséquent, dans une méthode pour la localisation et la classification d'impact de la foudre, et de la surveillance des pales en utilisant un réseau de capteurs de courant à fibre optique est proposée.

II.4. Les différents défauts des machines asynchrones

Dans une machine asynchrone, les défauts peuvent avoir des origines différentes. Ils peuvent être d'origine électrique ou mécanique. Ces défauts peuvent survenir suite à une mauvaise utilisation, un vieillissement prématuré ou un défaut de conception.

II.4.1. Défaillances électriques

II.4.1.1. Types et causes de défauts dans les machines électriques

Les progrès en ingénierie et en sciences des matériaux ont entraîné les machines électriques à devenir plus légères, tout en ayant une durée de vie considérable. Néanmoins, malgré les améliorations apportées aux techniques de conception, les défauts peuvent encore se produire. Selon l'étude statistique effectuée par une compagnie d'assurance Allemande de systèmes industriels, la répartition de défauts dans la machine asynchrone (MAS) est représentée sur les deux figures suivantes. Leurs observations s'étaient portées sur les machines de faible et moyenne puissance, 50 KW à 200 KW et sur des machines de grande puissance de 100 KW à 1 MW.

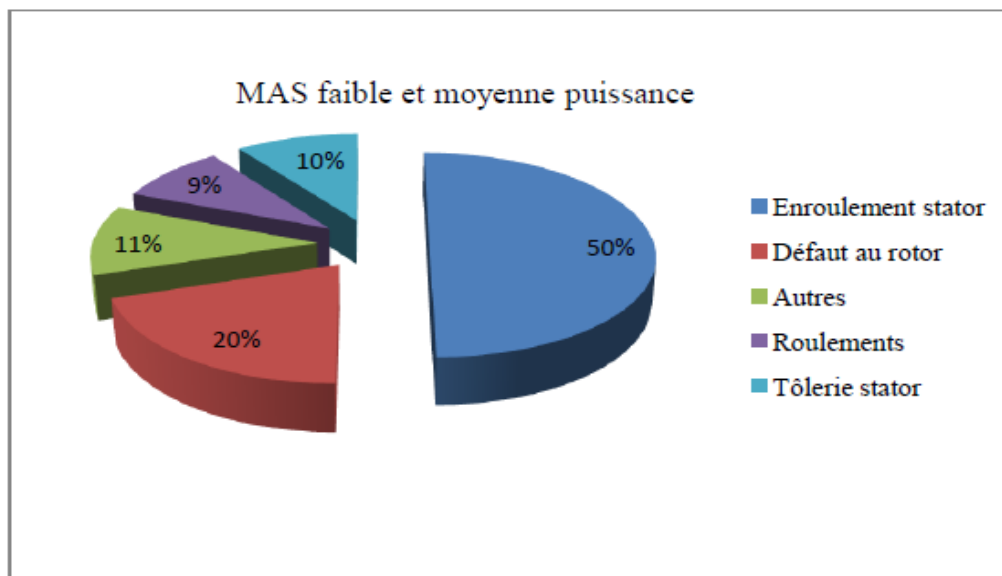


Fig. II.6 : Statistiques des défauts MAS de faible et moyenne puissance [15]

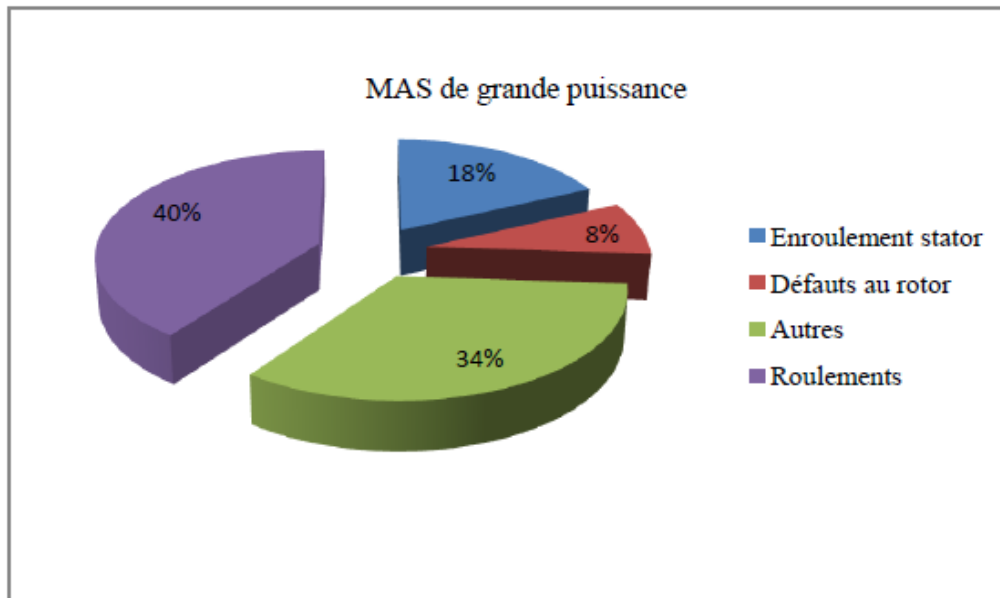


Fig. II.7: Statistiques des défauts MAS de grande puissance [15]

On voit sur la figure II.6 que les défauts les plus rencontrés sur les machines asynchrones de faible et moyenne puissance sont les défauts statoriques. Et sur la figure II.7, les défauts dus aux contraintes mécaniques occupent les pourcentages les plus élevés. En général, les défauts de la machine se divisent en quatre catégories :

- Les défauts statoriques
- Les défauts rotoriques
- Les défauts de roulement
- Les autres défauts

II.4.1.1.1. Défauts statoriques

Ils peuvent se situer au niveau des enroulements ou de la culasse. Dans la plus part des cas, la défaillance de l'enroulement démarre à partir d'un défaut entre spires. Finalement ce dernier grandit et entraîne les défauts entre les bobines, entre les phases, ou entre la phase et la terre, avant la détérioration du moteur.

Les causes de défaillances statoriques peuvent être dues à un des problèmes suivant :

- **Thermique** : la durée de vie de l'isolation est fixée pendant la conception de la machine, alors qu'en cours d'utilisation si la température augmente au dessus de la température de fonctionnement, la durée de vie de l'isolant se raccourcit rapidement. La variation de tension d'alimentation ou le déséquilibre, la répétition de démarrages dans un

laps de temps court, des surcharges, une mauvaise ventilation ou une haute température ambiante peuvent entraîner une augmentation de la température de l'isolant.

- **Electrique** : une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de la variation de la tension par rapport au temps suite à l'ouverture et fermeture répétitive des interrupteurs du convertisseur statique vont conduire rapidement à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant et qui peut créer des spots carbonisés dans l'isolant. Ces spots causent des déformations du champ électrique et une augmentation de ce champ apparait dans la région du défaut.

- **Mécanique** : les démarrages répétitifs de la machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre. Cet effet cyclique crée des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoque un début de court circuit interne de l'enroulement. Autre cause de défaut, les efforts mécaniques sur les conducteurs et les conducteurs peuvent provoquer des vibrations de la structure. L'effet de ces efforts mécaniques provoque l'érosion et l'abrasion de l'isolant. Dans le cas des machines à moyenne et grande puissance, le noyau est comprimé avant l'emplacement des tôles afin de minimiser les vibrations des feuilles de laminage et de maximiser la conductivité thermique. Les problèmes des noyaux sont rares, seulement 1% par rapport aux problèmes d'enroulement.

- **Environnemental** : la présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à un défaut d'enroulement. En effet, il y a apparition de courants de fuite et ces problèmes accélèrent la détérioration de l'isolant allant jusqu'au court circuit franc. Une autre conséquence est la création d'ozone et d'oxydes d'ozone qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, et peuvent détruire l'isolant.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court circuit entre spires, court circuit entre phases, court-circuit entre phase et bâti, déséquilibre d'alimentation et défaut de circuit magnétique.

II.4.1.1.2. Défauts rotoriques

Les défauts rotoriques sont essentiellement dus à un problème thermique, électromagnétique, résiduel, dynamique, ou d'environnement. Les défauts les plus récurrents et les plus localisés peuvent être la rupture de barres, une portion d'anneau de court circuit dans les machines asynchrones à cage d'écureuils, l'échauffement qui entraîne une détérioration de l'isolant

suivie par un court circuit des enroulements dans le cas des machines asynchrones à rotor bobiné (MARB). Dans les deux types de machines, on peut trouver aussi l'excentricité statique et dynamique du rotor.

- **Ruptures de barres** : la cassure de barres est le défaut le plus rencontré dans la machine asynchrone à cage d'écureuil (MACE). Le défaut peut se situer soit au niveau de l'encoche soit au niveau des extrémités qui relient l'anneau de court circuit et les barres. Ce défaut peut provoquer une réduction de la valeur moyenne du couple électromagnétique et qui entraîne une variation ascendante de l'amplitude des oscillations, et donc une variation de la vitesse de rotation. Cette dernière peut engendrer un fonctionnement anormal de la machine et des vibrations mécaniques.

- **Ruptures d'anneaux** : ce type de défaut est plus présent que la rupture de barre pour la machine asynchrone à cage. Elles peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations des différentielles entre les barres et les anneaux. Ce type de défaut est difficile à détecter car on le confond souvent avec la rupture de barre. Ils entraînent un déséquilibre de la répartition des courants dans les barres rotoriques donc une modulation d'amplitude sur les courants statoriques. Ces signatures de défaut sont similaires à celles provoquées par la cassure de barres.

- **Excentricité statique et dynamique** : généralement liées à un mauvais alignement du rotor. Le défaut se traduit par des oscillations de couple. Ce phénomène est appelé excentricité statique et dynamique du rotor. L'origine de ce défaut est due au positionnement incorrect des paliers pendant l'assemblage du moteur ou à un défaut de roulement, de charge ou d'usinage. Il y a trois types d'excentricités :

- ❖ **Excentricité statique** ou le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe,
- ❖ **Excentricité dynamique** ou le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe,
- ❖ **Excentricité mixte** associant les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine et induit une augmentation des forces électromagnétiques agissant sur l'armature statorique et l'enroulement suite à la dégradation de son isolant. Les défauts d'excentricités peuvent provoquer des vibrations considérables dans les enroulements.

- **Défaut dans l'enroulement** : pour la machine asynchrone à rotor bobiné, les dégradations des isolants provoquent des courts-circuits. En effet, les différentes pertes engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température et tension. Les causes de défauts d'enroulement sont dûs à la dégradation d'isolants, la tension d'alimentation supérieure à la tension limite supportée par l'isolant, le courant élevé, la surcharge, la vibration mécanique, le vieillissement naturel de l'isolant ou le fonctionnement dans un environnement sévère.

II.4.1.1.3. Défauts de roulement

Le roulement est l'interface entre le stator et le rotor. Il présente un vieillissement relativement rapide. Les défauts de roulement à billes sont diagnostiqués à partir du spectre de la mesure acoustique ou vibratoire. Les défauts peuvent être causés par un mauvais choix des matériaux à l'étape de la fabrication, des problèmes de rotation au sein de la culasse, ou par un roulement abimé, écaillé ou fissuré. Ces derniers peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Les défauts sont de type : trous dans les gorges du roulement intérieur et extérieur, ondulation de la surface du roulement, corrosion due à l'humidité ou l'eau, graissage, décollement, ou effritement de surface provoqué par une surcharge.

II.4.1.1.4. Autres défauts

Ils peuvent correspondre à un défaut du flasque ou de l'arbre. Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus souvent introduits à l'étape de fabrication.

II.4.1.1.5. Causes des défauts

Les causes des défauts dans les machines électriques sont multiples, mais peuvent être classés en trois catégories.

- **générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique du au court circuit, surtension d'alimentation, problème d'isolation, usure des éléments mécaniques, ou rupture de fixation.

- **amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, ou vieillissement.

- **vices de fabrication et erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, désalignement du rotor, ou mauvais dimensionnement de la machine.

De même, malgré sa robustesse incontestable, la machine asynchrone peut présenter différents types de défauts qui peuvent être classifiés en deux catégories,

- Le défaut dur ou défaut brutal, modélisé par un changement brusque des entrées ou des paramètres du système.
- Le défaut doux ou défaut naissant, se réfère généralement à des changements progressifs des paramètres du système par rapport à leurs valeurs normales.

II.4.2. Défaillances mécaniques

Sur une machine asynchrone, les défaillances mécaniques sont très courantes et représentent 45% des défaillances observées. Ces défaillances sont essentiellement liées aux défauts de roulement et d'excentricité. [15]

Les roulements sont souvent le siège de défaillances. Un roulement dégradé peut avoir pour conséquence une vibration anormale de la machine. Des travaux concernant l'impact des défauts de roulements sur le couple résistant C_r des machines asynchrones ont été réalisés et montrent que les courants statoriques sont affectés par ces défaillances. En particulier, une modulation de phase apparaît. Un défaut de roulement agit directement sur le couple résistant C_r en le faisant varier :

$$C_r = C_0 + \sum_n C_n \cos(w_n \cdot t)$$

Avec C_0 un couple constant et w_n le spectre des fréquences issues du défaut.

Un mauvais centrage du rotor par rapport au stator est également un défaut mécanique que l'on appelle excentricité statique comme l'illustre la figure II.8.

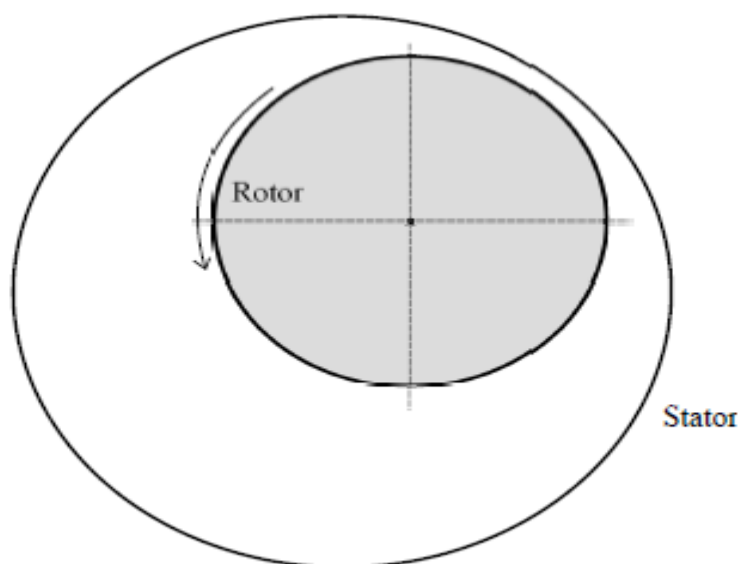


Figure II.8: Représentation de l'excentricité statique [15]

Les asques qui obturent de part et d'autre la machine peuvent aussi être source de problèmes.

En effet, un mauvais usinage ou un vieillissement peut entraîner un désalignement de l'axe central de la machine provoquant une excentricité dynamique. Elle se traduit par un mouvement de rotation du rotor autour de l'axe statorique tel que l'illustre la figure II.9.

Ces problèmes d'excentricités impactent directement le fonctionnement de la machine. En effet, l'entrefer n'étant plus constant, les inductances propres et mutuelles de la machines sont modifiées. Il s'agit donc d'un problème majeur dans le fonctionnement des génératrices asynchrones d'autant plus qu'il se manifeste régulièrement. [15]

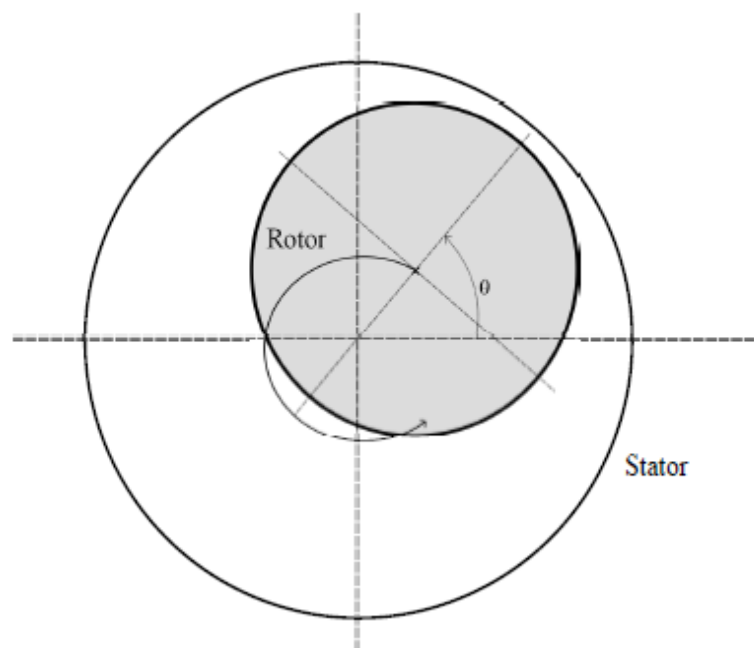


Figure II.9: Représentation de l'excentricité dynamique [15]

CHAPITRE III :

Différents défauts des machines asynchrones

III .1. Défaillances de la machine asynchrone et leurs origines

Les défaillances peuvent être d'origines diverses: électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques.

III .1.1. Défaillances d'ordre mécanique

En général, les défaillances d'ordres mécaniques sont les plus rencontrés parmi tous les défauts de la machine asynchrone, ces défauts peuvent apparaître au niveau des flasques, ou encore de l'arbre du moteur.

III .1.1.1. Défauts des roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse de roulement, causés par un enroulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. Les défauts des roulements se manifestent comme de défauts d'asymétrie au rotor qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur. [16]

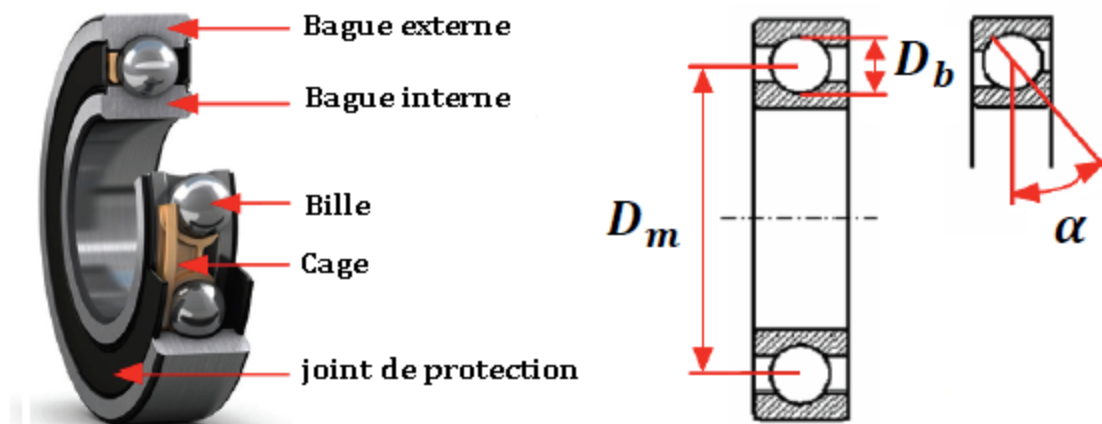


Figure III.1 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes. [15]

Avec :

D_m : Diamètre moyen du roulement.

D_b : Diamètre d'une bille.

α : Angle de contact de la bille avec les bagues.

N_b : Nombre de billes.

f_r : Fréquence de rotation mécanique.

Le roulement est constitué de deux bagues concentriques en acier, nommées bague intérieure et bague extérieure, il contient aussi des billes généralement en acier qui facilitent le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal et une cage distinguant et guidant les corps roulants.

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

- contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, ...
- corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- lubrification inadéquate qui peut causer un échaudement et l'usure du roulement.
- mauvais alignement du rotor.
- installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

III .1.1.2. Défauts d'excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [15]

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées :

- **L'excentricité statique** : (Figure (III.2-a)), généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- **L'excentricité dynamique** : (Figure (III.2-b)), correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- **L'excentricité mixte** : (Figure III.3) – la somme des deux cas présentés ci-avant.

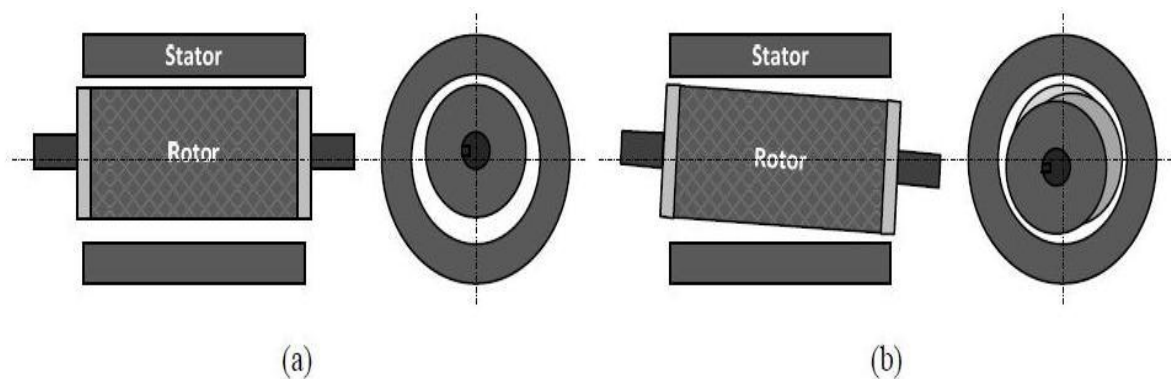


Figure III.2 : L'excentricité statique et dynamique. [15]

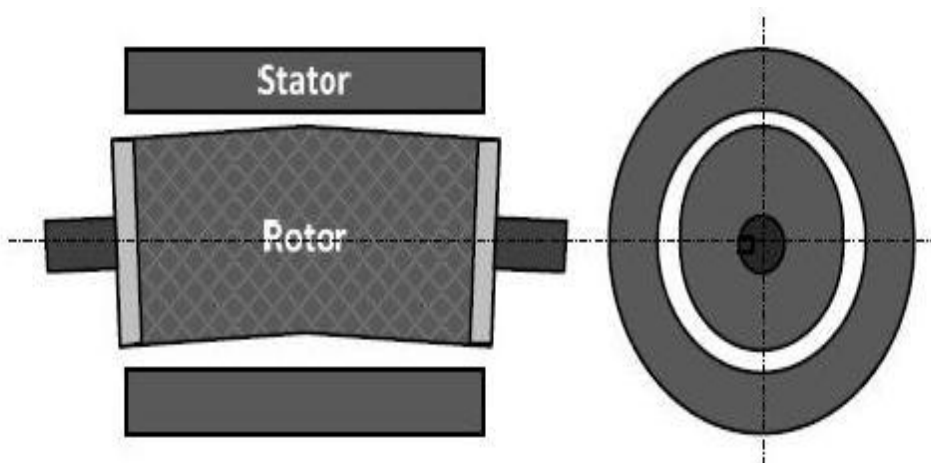


Figure III.3 : L'excentricité mixte. [15]

III .1.1.3. Défauts du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire où analyse harmonique des courants absorbés par la machine [16].

III .1.2. Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine. Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celle qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [16].

III .1.2.1. Défauts des circuits électriques statoriques

Les défaillances des circuits électriques statoriques peuvent avoir diverses origines. A titre d'exemples, on peut citer :

- rupture d'isolation,
- Les courts-circuits entre phases : provoquent un arrêt net de la machine,
- Les courts-circuits entre phase et neutre : provoquent un déséquilibre des phases,
- Les courts-circuits inter-spires : ce sont les plus couramment rencontrés et les plus nuisibles, ils se produisent à l'intérieur des encoches,
- rupture des connexions.

Ces défauts ont généralement pour cause principale le vieillissement prématuré des isolants du aux vibrations et échauffements excessifs de la machine ainsi qu'aux surtensions provoquées par les circuits de commande [14].

Ces types de défaillances entraînent :

- Un changement de la densité de flux magnétique dans l'entrefer,
- Un changement de la signature du courant statorique,
- Un changement de la fonction de transfert de la machine,
- Des vibrations,
- Un échauffement de la machine.

III .1.2.2. Défauts des circuits électriques rotoriques

Ces défaillances sont des ruptures totales ou partielles d'une ou plusieurs barres ou d'une portion d'anneau de court-circuit de la cage d'écureuil. Parmi les causes entraînant ces défaillances, on peut citer [14] :

- Surcharge de la machine,
- Démarrages trop fréquents induisant des courants élevés dans les barres ou dans les segments d'anneaux,
- contraintes mécaniques causées par des forces électromagnétiques ou des vibrations mécaniques excessives,

La cassure d'une barre ou d'une portion d'anneau n'entraîne pas l'arrêt immédiat de a machine mais cela cause [14] :

- Un changement de la signature du courant de ligne,
- Un changement de la signature de la tension,
- Un changement de la densité de flux magnétique dans l'entrefer,
- Des vibrations,
- Des fluctuations de la vitesse,

CHAPITRE IV :

L'application de l'arbre de décision pour
la détection des défauts de roulements

Les arbres de décision sont utilisés lorsqu'on traite un problème de classification et de décision. Le processus de la classification consiste à affecter une classe à des objets à l'aide d'un modèle entraîné sur un autre ensemble d'objets, dans ce chapitre on a appliqué l'arbre de décision dans la détection des défauts dans les roulements en utilisant le logiciel WEKA.

IV.1. Arbre de décision

Les arbres de décision sont utilisés lorsqu'on traite un problème de classification ou de décision. Le processus de la classification consiste à affecter une classe à des objets à l'aide d'un modèle entraîné sur un autre ensemble d'objets. Il s'agit de classer un ensemble de données en les représentant sous forme d'un arbre. Il s'agit de prédire avec précision les valeurs prises par une décision à partir d'un ensemble d'attributs prédictifs. Ainsi chaque ensemble de données est constitué d'une liste d'attributs prédictifs et des décisions à prédire.

Un arbre de décision est composé de feuilles, de nœuds et de branches. Chaque nœud de l'arbre correspond à une propriété de l'objet à classer, appelé attribut. Chaque branche de l'arbre correspond à une valeur possible de l'attribut père et chaque feuille de l'arbre correspond à une classe ou décision (voir Figure IV.1).

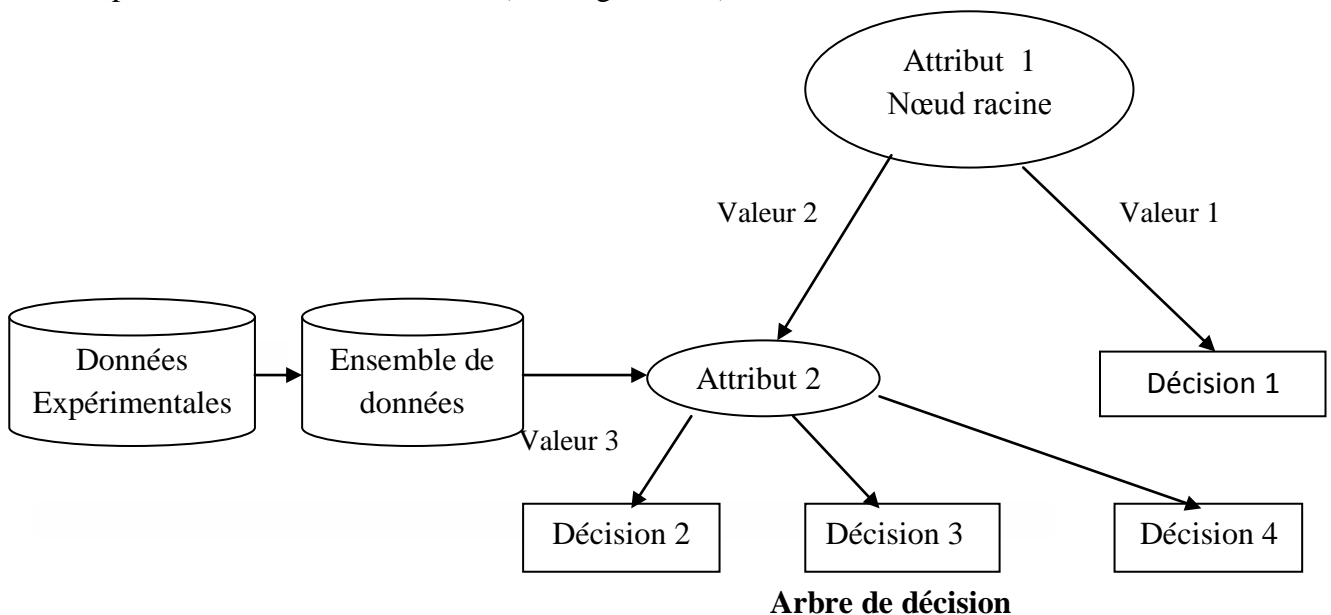


Figure IV.1 : schéma pour l'extraction des connaissances [21]

R1: Si Attribut1= Valeur] Alors Décision 1

R2: Si Attribut1= Valeur 2 et Attribut 2 = Valeur 3 Alors Décision 2

R3: Si et ...alors...

Le principe de la construction de cet arbre est basé sur l'extraction des informations contenues dans les données en utilisant des algorithmes de classification. Parmi ces algorithmes, C4.5 est l'un des algorithmes d'induction d'arbres de décisions les plus connus et les plus utilisés aujourd'hui. Dans le présent travail on utilise l'algorithme C4.5, incorporé dans le logiciel WEKA sous code J48.

IV.2.Choix des attributs et des classes

IV.2.1.Choix des attributs (voir Tableau 2)

Tableau 2 : Attributs de l'arbre de décision [21]

	attributs	valeurs
1	BCU	Sans si $BCU < 0.8$ Normale si $0.8 < BCU \leq 1$ Alerte si $1 < BCU \leq 1.5$ Danger si $BCU \geq 1.5$
2	Fréquences	Numérique

V.2.2.Choix des classes

Tableau 3 : Classes de l'arbre de décision [21]

N ⁰	Classes	symbole
1	Roulement sans défaut	Sans
2	Défaut sur la bague interne et sévérité normale	in
3	Défaut sur la bague interne et sévérité alerte	ia
4	Défaut sur la bague interne et sévérité danger	id
5	Défaut sur la bague externe et sévérité normale	en
6	Défaut sur la bague externe et sévérité alerte	ea
7	Défaut sur la bague externe et sévérité danger	ed
8	Défaut sur les éléments roulants et sévérité normale	érn
9	Défaut sur les éléments roulants et sévérité alerte	éra
10	Défaut sur les éléments roulants et sévérité danger	érd

IV.3. Détection des défauts de roulement

La liste des attributs choisis inclut les indicateurs de détection suivants : le BCU, la fréquence et le niveau de la sévérité qui est fonction de la valeur BCU. Les classes représentent l'état de roulement : Sans, in, ia, id, en, ea, ed, (Figure IV.2). Les détails des attributs et des classes désignés sont résumés dans les tableaux 2 et 3.

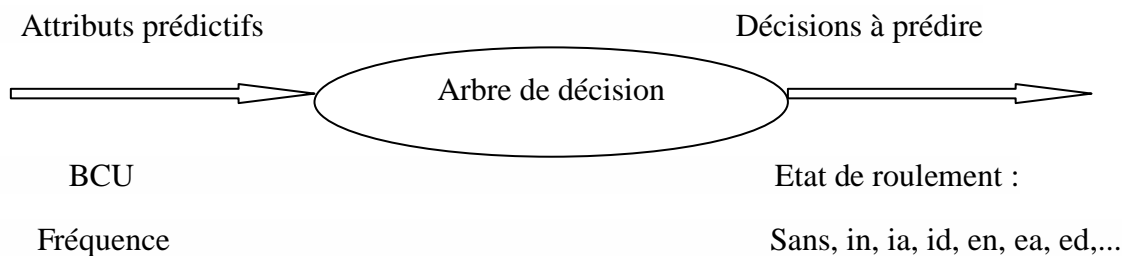


Figure IV.2: Attributs et décisions

IV.4. Etablissement de l'arbre de décision

IV.4.1. Logiciel WEKA

(Waikato Environment for Knowledge Analysis) :

Environnement de Waikato pour analyser les connaissances, est un logiciel libre dédié au data Mining. Parmi les fonctionnalités qu'il couvre, on trouve les arbres de décision. Selon définition, un arbre de décision est un outil d'aide à la décision et à l'exploration de données. Il permet de modéliser simplement, graphiquement et rapidement un phénomène mesuré plus au moins complexe. Sa lisibilité, sa rapidité d'exécution et le peu d'hypothèses nécessaires à priori expliquent sa popularité actuelle.

L'installation de WEKA est facile et rapide, il peut être lancé à partir du menu démarrer en cliquant sur weka 3.8. La fenêtre suivante s'ouvre :

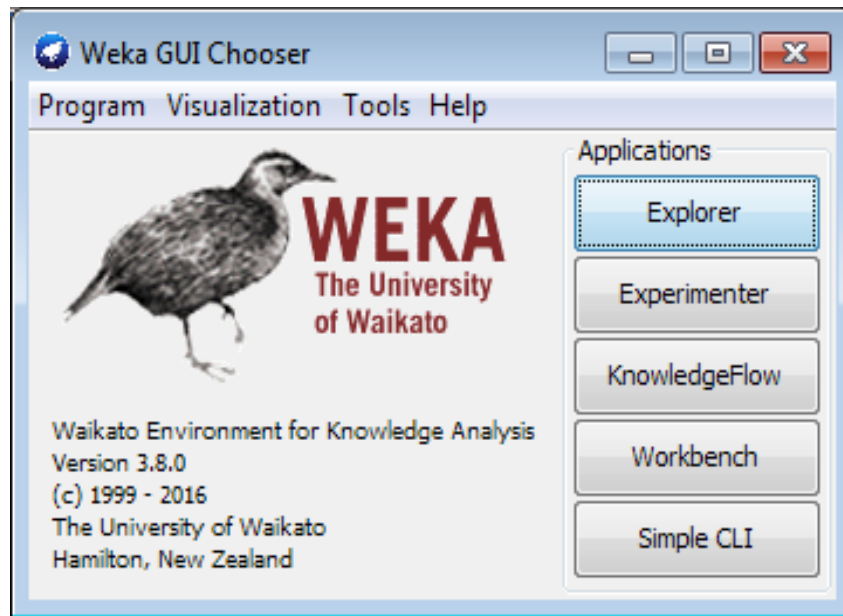


Figure IV.3 : Logiciel WEKA [21]

IV.4.2.Extraction des données et export sous format arff

Différents formats de fichiers de données sont supportés par WEKA on peut citer le *arff* et le *csv*. En général le format le plus utilisé est le *arff*. Pour ces raisons on a construit les bases de données pour l'apprentissage et le test en utilisant ce même format.

Cette base est construite à partir des attributs et des classes donnés par les tableaux.

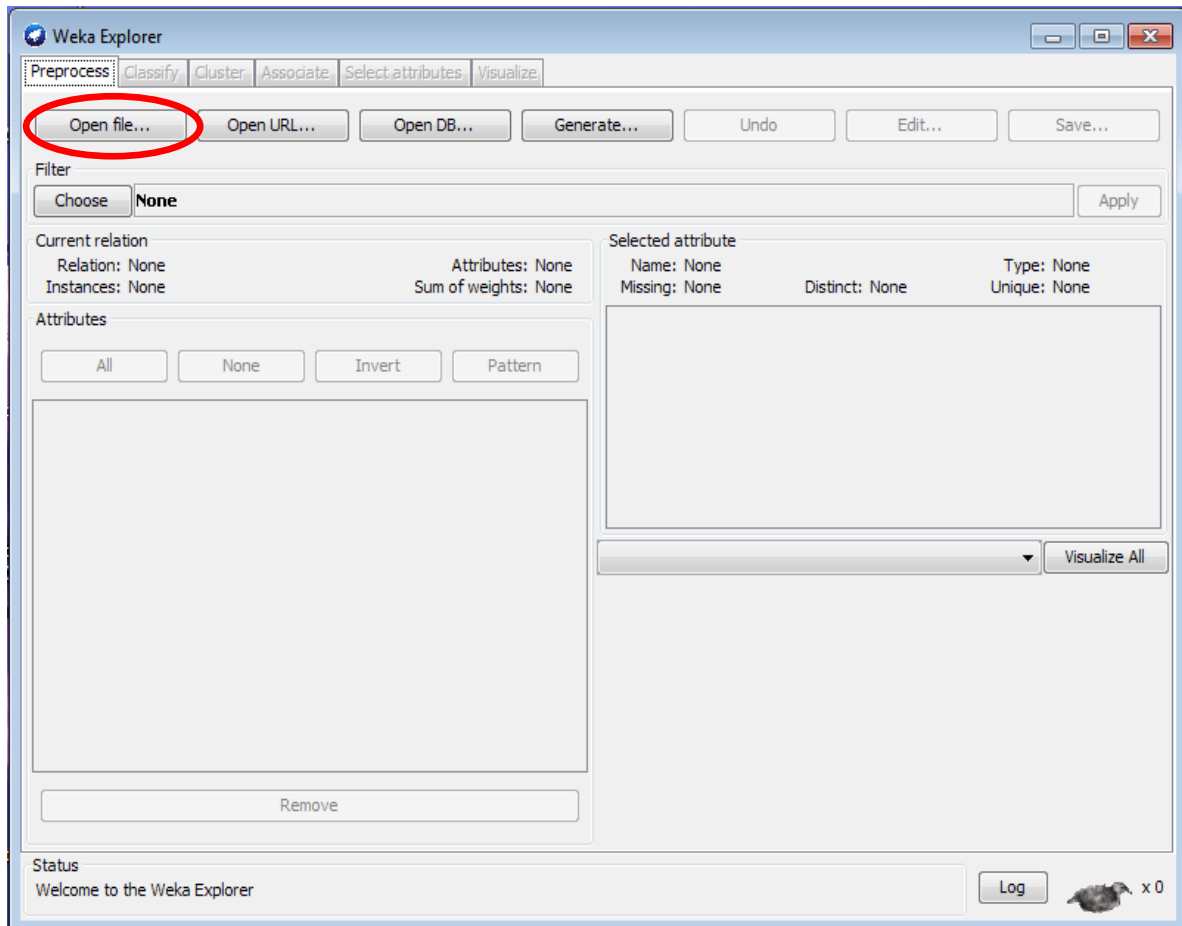
IV.4.3.Connexion au fichier de données

Pour se connecter au fichier précédent préparé, cliquer sur *Explorer* sur la première fenêtre apparue lors du lancement de WEKA.

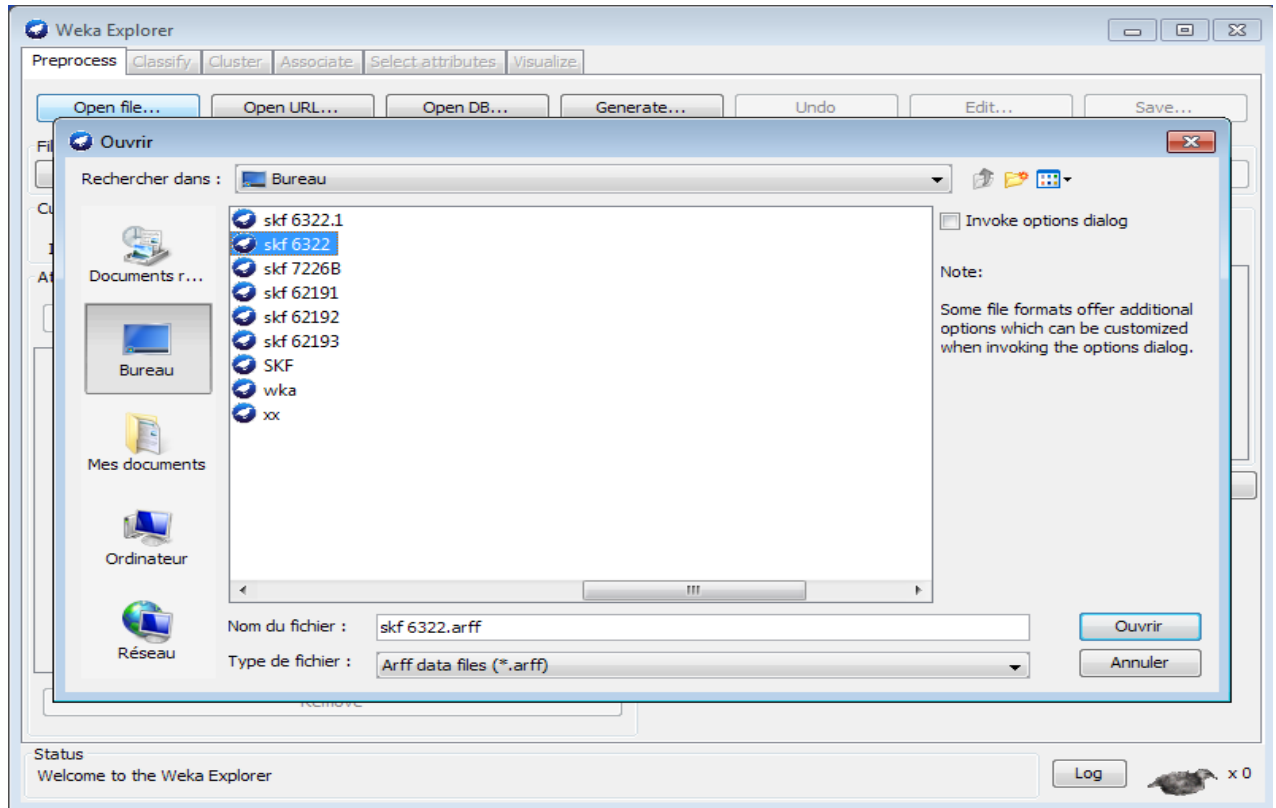
Par exemple le fichier de roulement SKF 6322 :



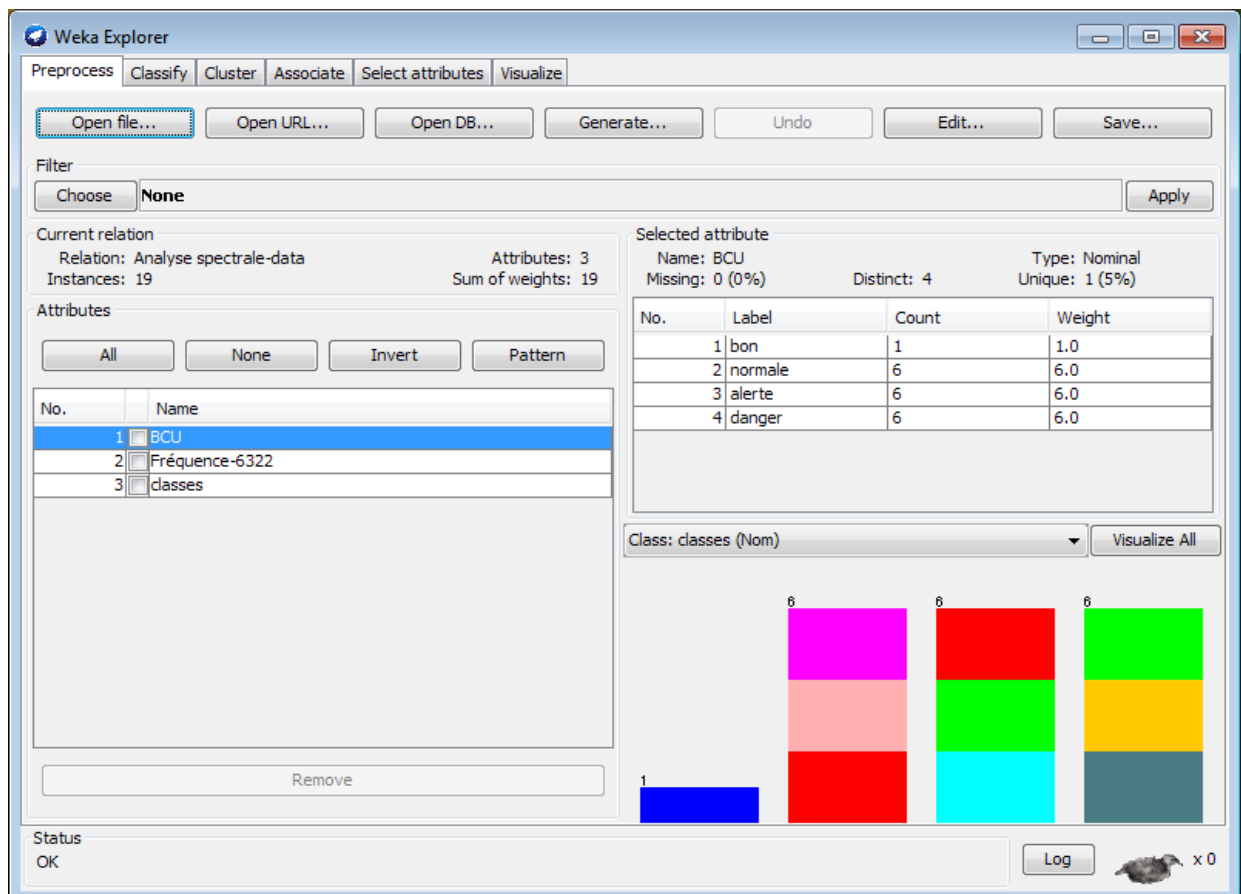
Ensuite, cliquer sur **Open file...** de l'onglet **Preprocess**.



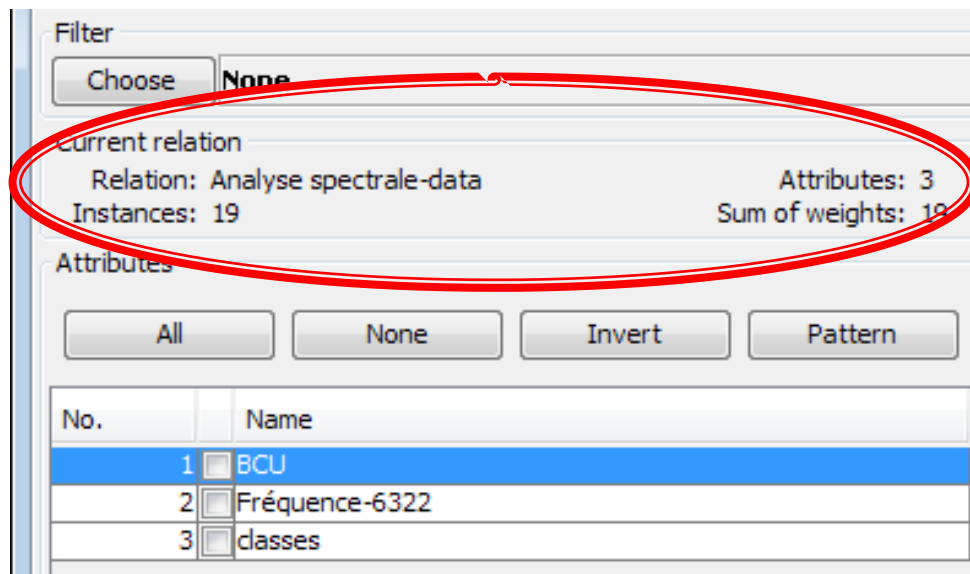
Dans la fenêtre qui s'ouvre choisir le type de fichier arff comme suit :



Et cliquer sur ouvrir. Vous aurez un aperçu du genre :



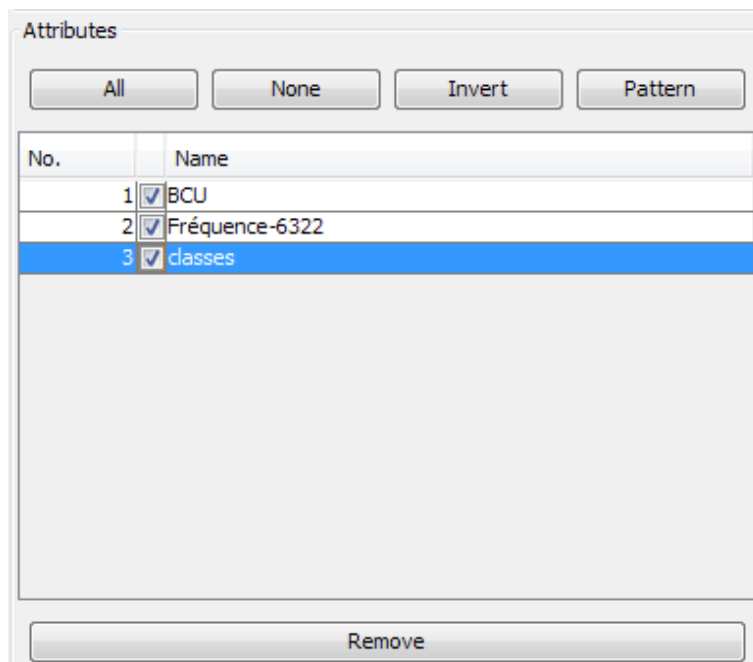
Cet aperçu comporte plusieurs parties. On trouve :



La partie current relation : qui montre :

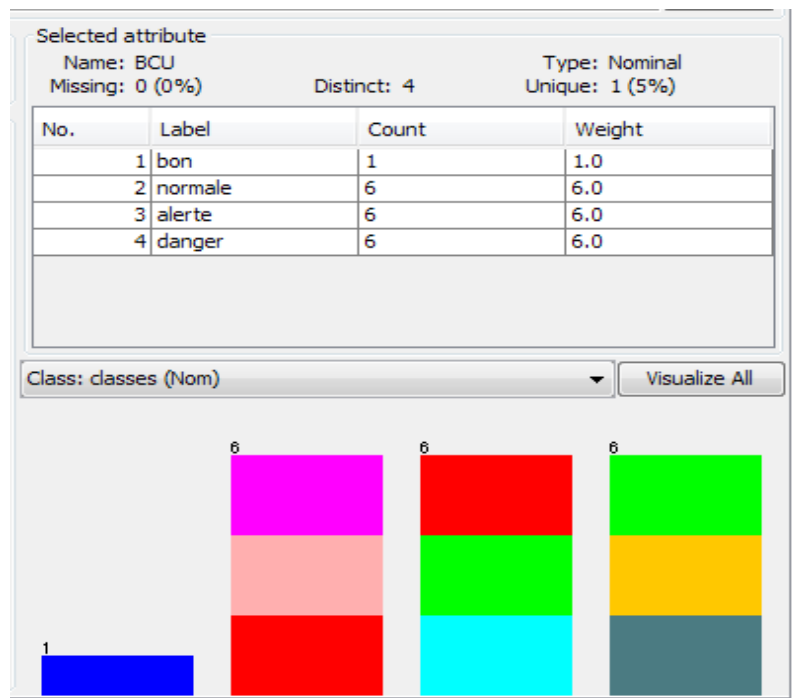
- **Relation** : le nombre du fichier *arff* utilisé, dans ce cas c'est *Analyse spectrale -data*.
- **Instances** : le nombre d'instances du fichier, dans ce cas c'est 19.
- **Attributes** : le nombre d'attributs traité, dans ce cas c'est 3.

La partie attributes :



Qui explicite les attributs figurant dans le fichier à traité. L'utilisateur peut à tout moment cocher un attribut et cliquer sur le bouton **Remove** pour l'enlever de l'analyse.

La partie Selected attribute :

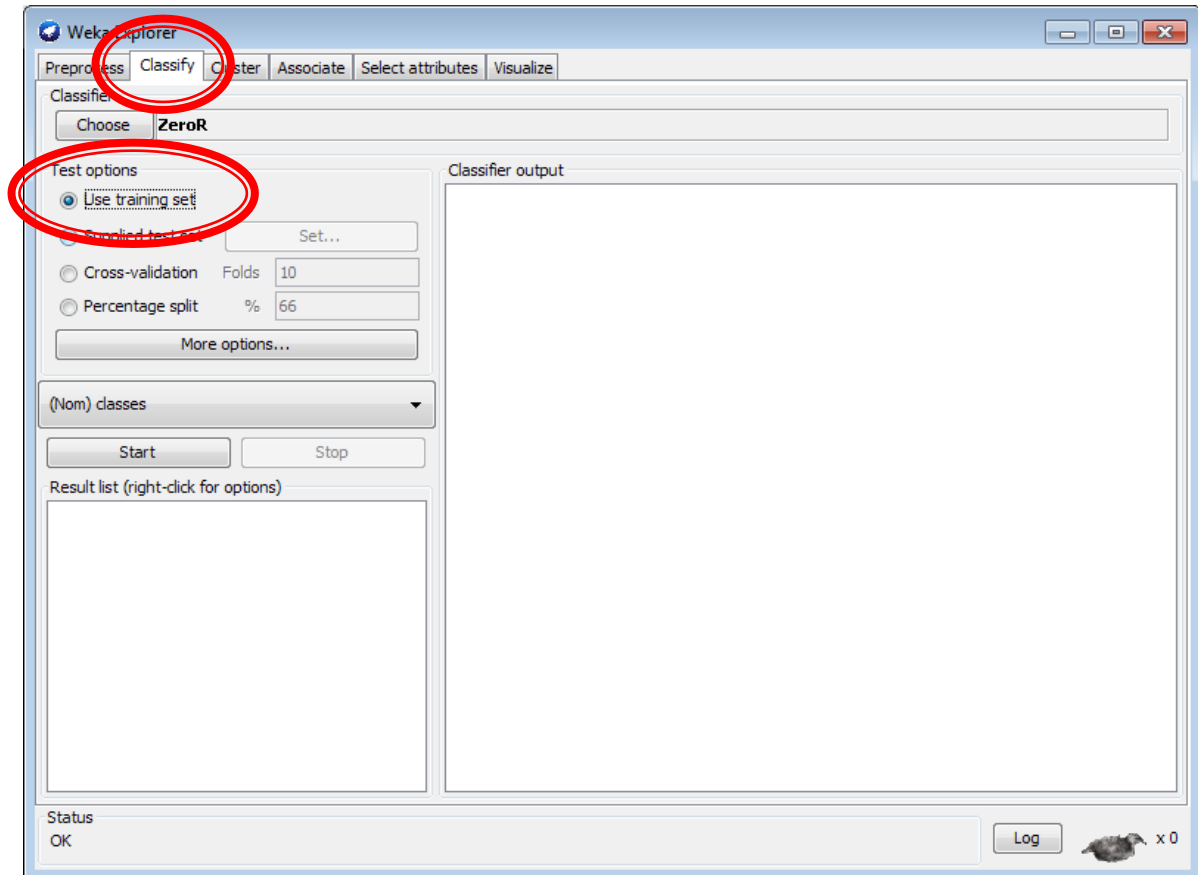


Qui donne des statistiques sur l'attribut sélectionné dans la partie Attributes (le nom de l'attribut, son type : numérique ou texte, nombre d'occurrences distinctes, le minimum et le maximum si c'est attribut numérique, le nombre d'occurrences si c'est attribut de type texte...).

Cette partie comporte aussi un graphe en rectangles composé des couleurs correspondants à chaque classe.

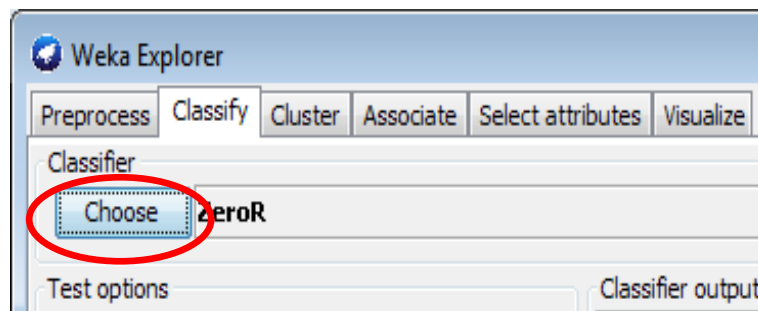
IV.4.4.Établissement de l'arbre de décision

Pour établir l'arbre de décision cliquer sur l'onglet **Classify**, choisir l'option **Use training set** de **Test option** comme suit :

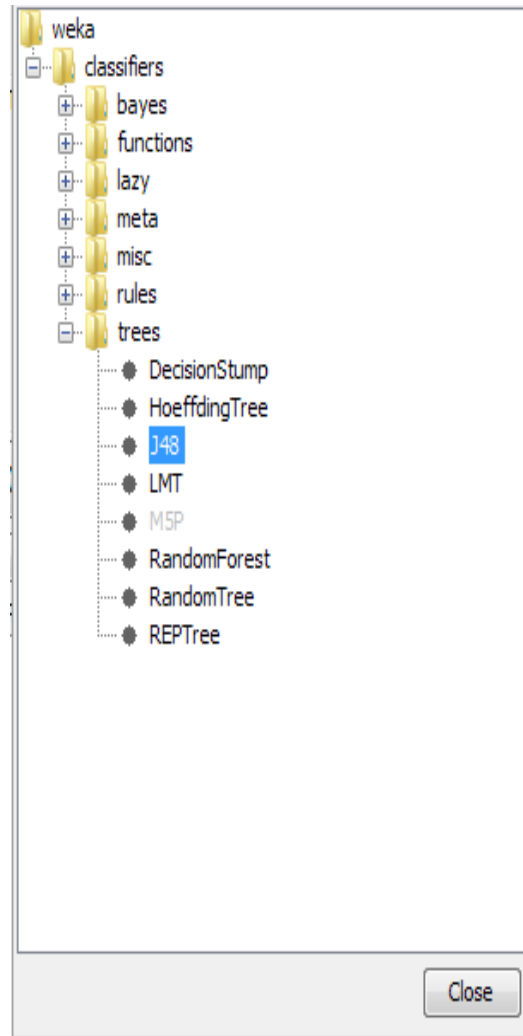


En suite, cliquer sur le bouton **Choose** de Classifier pour choisir un algorithme parmi ceux proposés par WEKA.

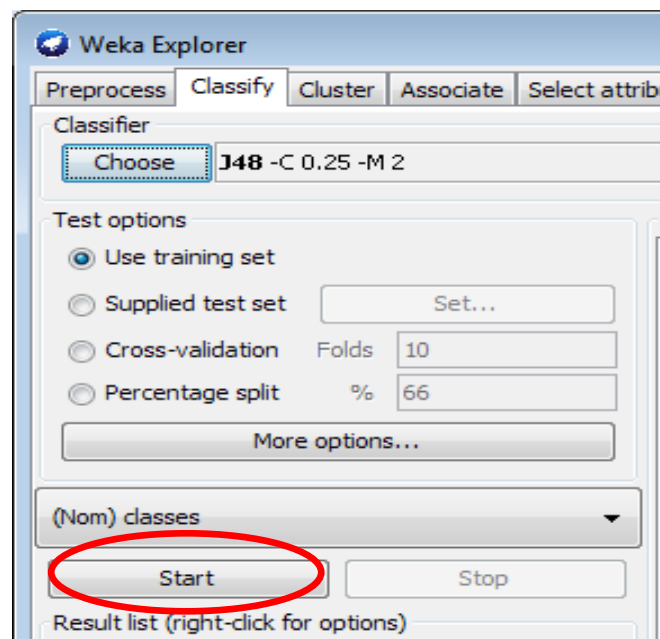
Dans mon cas je vais utiliser l'algorithme **J48**.



Dans la fenêtre qui s'ouvre, développer le dossier **trees** et choisir l'algorithme **J48** :



Cliquer sur *Start* pour effectuer l'analyse



Vous aurez un écran qui ressemble à ceci :

```

Classifier output

=== Run information ===

Scheme:      weka.classifiers.trees.J48 -C 0.25 -M 2
Relation:    Analyse spectrale-data
Instances:   19
Attributes:  3
              BCU
              Fréquence-6322
              classes
Test mode:   evaluate on training data

=== Classifier model (full training set) ===

J48 pruned tree
-----

BCU = bon: Sans (1.0)
BCU = normale
|  Fréquence-6322 = 121: in (2.0)
|  Fréquence-6322 = 75: en (2.0)
|  Fréquence-6322 = 98: érn (2.0)
BCU = alerte
|  Fréquence-6322 = 121: ia (2.0)

```

```

Classifier output

Number of Leaves :    10

Size of the tree :    14

Time taken to build model: 0 seconds

=== Evaluation on training set ===

Time taken to test model on training data: 0 seconds

=== Summary ===

Correctly Classified Instances      19           100   %
Incorrectly Classified Instances     0            0   %
Kappa statistic                      1
Mean absolute error                   0
Root mean squared error               0
Relative absolute error               0   %
Root relative squared error           0   %
Total Number of Instances           19

=== Detailed Accuracy By Class ===

```

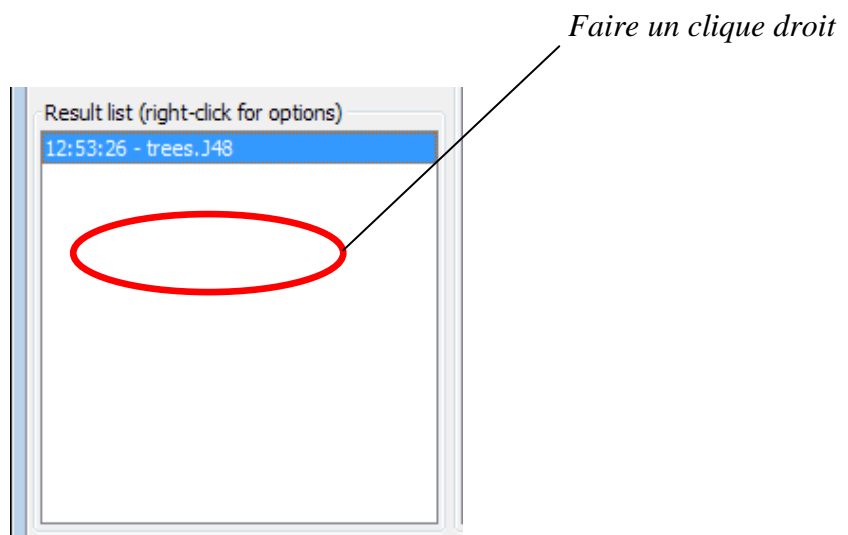
Dans la parties **Classifier output** vous avez des statistique sur le fichier exploité, à savoir le nombre d'instances, **Total Number of Instances** de votre fichier, le nombre d'instances correctement classifiées **Correctly Classified, Instances** et incorrectement classifiées **Incorrectly Classified Instances** et autres statistique à découvrir !

Sur le même écran vous avez aussi la matrice de confusion : **Confusion Matrix** de cette analyse.

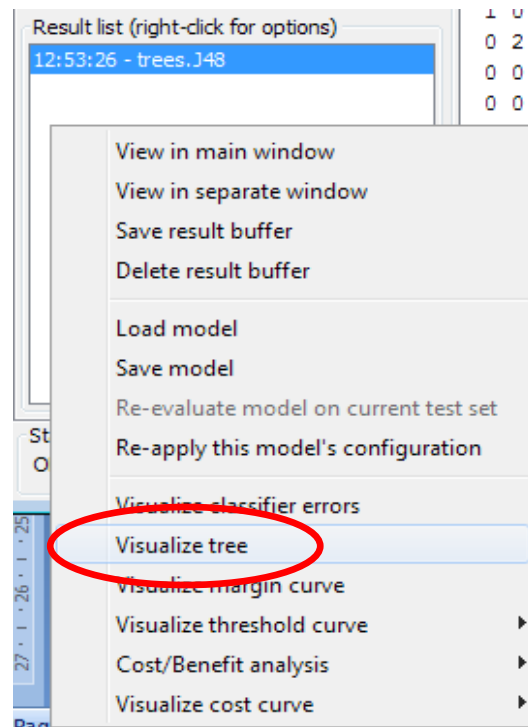
```
=== Confusion Matrix ===

 a b c d e f g h i j  <-- classified as
 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 | a = Sans
 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 | b = in
 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0 | c = ia
 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 | d = id
 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 | e = érn
 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 | f = éra
 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 | g = érd
 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 | h = en
 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 | i = ea
 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 | j = ed
```

Pour afficher l'arbre de décision, cliquer droit dans la partie **Result list(right-click for option)** :



Lors de cette clique droite un menu d'option s'affiche comme suit :



Choisir l'option **Visualize tree**.

L'arbre de décision s'affiche ressemblant à ceci :

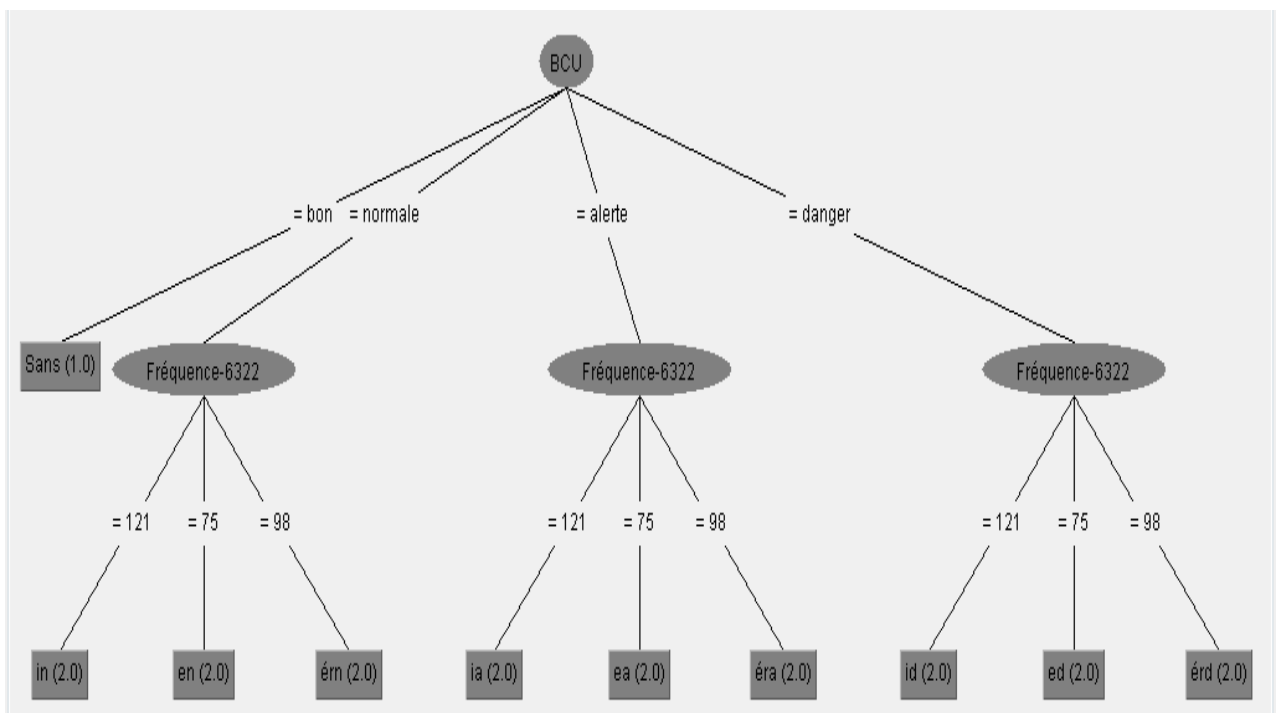


Figure IV.4: L'arbre de décision

IV.4.5. Analyse de l'arbre

D'après la Figure IV.4 qui correspond aux classes et attributs, on constate que tous les attributs choisis de l'ensemble de données étudié apparaissent dans l'arbre de décision.

Cela confirme l'importance de ces attributs pour prendre une décision dans le processus de détection des anomalies. En outre, le (Bearing Condition Unit) BCU défini par l'arbre, du nœud racine signifie qu'il est plus fiable que la fréquence.

Chaque chemin de l'arbre qui va de la racine à une feuille peut être traduit en règle sous forme : **Si conditions Alors Décision**. À partir de la Figure IV.4, on peut extraire les règles de décision suivantes :

Règle 1 : Si BCU = Bon Alors Roulement sans défaut,

Règle 2 : Si BCU = Normale et Fréquence-6322 = 121 Alors Roulement avec un défaut sur la bague interne sévérité normale.

Règle 3 : Si BCU = Normale et Fréquence-6322= 98 Alors Roulement avec un défaut sur les éléments roulants sévérité normale.

Règle 4 : Si BCU = Normale et Fréquence-6322 = 75 Alors Roulement avec un défaut sur la bague externe sévérité normale.

De la même manière, on peut traduire l'ensemble des chemins sous forme de règles de décision.

Finalement nous pouvons être utilisés cet arbre dans les suivis des roulements, ses règles sont très riche connaissance qui peut être facilité les taches aux experts dans le domaine.



Conclusion

L'évolution croissante des machines asynchrones et surtout à double alimentation dans les secteurs éoliens et industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine.

Le travail présenté traite la détection et l'identification de défaut de roulement par l'utilisation de l'arbre de décision.

Les arbres de décision répondent simplement à un problème de discrimination, c'est une des rares méthodes que l'on peut présenter assez rapidement à un public non spécialiste du traitement des données sans se perdre dans des formulations mathématiques délicates à appréhender.

L'objectif de cette étude réside dans l'utilisation de l'arbre de décision dans la prise de décision dans un processus de détection et d'identification de défaut de roulement d'une machine asynchrone à double alimentation. Elle vise à extraire des connaissances à partir de données vibratoires issues d'historiques d'une machine. L'algorithme C4.5 décrit précédemment a permis la construction des arbres de décision et la modélisation graphique permettant de caractériser l'état d'un roulement. Cette approche est validée à partir des valeurs des paramètres de performances qui indiquent que les arbres de décision obtenus donnent des informations pertinentes quant à l'état d'un roulement. La lisibilité et la simplicité de ces arbres de décision offrent une aide dans l'extraction des règles de décision. Cette approche a un avantage certain sur les systèmes experts qui n'arrivent pas toujours à dégager les règles expertes.

Pour que les arbres et les règles soient significatifs, il faut utiliser un ensemble de données plus important en considérant d'autres types de défauts de roulement tels que les défauts de cage ou de billes. Il faut également porter une correction sur l'imprécision des seuils limites en terme d'amplitude et sur l'imprécision sur les fréquences (mesurées et théoriques) en intégrant des facteurs de certitude dans les règles expertes.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Dale E. Berg « Wind Energy Conversion». Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy 2007 by Taylor & Francis Group, LLC
- [2] : S. EL AIMANI. « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.
- [3] : A. MAAFA. «Étude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence». Diplôme de Magister en Electrotechnique. Université El Hadj Lakhdar de Batna, soutenu le 19/06/2011
- [4] : F. POITIERS. «Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne».
-Machine asynchrone à cage autonome
-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, soutenu le 19/12/2003.
- [5] : Y. Abderrahmane BENCHERIF. «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne». Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique. El Harrach, Alger. Juin 2008.
- [6] : N. HAMDI «Modélisation et commande des génératrices éoliennes». Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme de magister en Electrotechnique. Université MENTOURI de CONSTANTINE, Soutenu le : 24 /01/2008.
- [7] : A. MELLOUL «Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne». Pour l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE). Soutenu le 07/06/2011.
- [8] N. ZABOUB et I. BENMOSTIFA «Etude des performances d'une chaîne de conversion éolienne». Mémoire de master en énergie mécanique. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Soutenu le : 16/06/2015
- [9] : M. SI BRAHIM « Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone». Pour l'obtention de grade de docteur 3^{eme} cycle en Electrotechnique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Soutenu le : 16/06/2015.
- [10] : H. CAMBLONG «Minimisation de l'impacte des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ». Thèse de doctorat, Bordeaux. Soutenu le : 18/12/2003
- [11] :B. KELKOUL «Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation». Pour obtenir le grade de Magister API. Université de TLEMEN, Soutenu le : 29/06/2011.
- [12] : A. MOUSSA SIDDO et I. SOUMANA NOUHOU « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne». Diplôme d'Ingénieur d'Etat en

Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie 2007.

[13] : I. ATTOUI «Contribution au diagnostic de défaut d'une génératrice asynchrone dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne». Thèse de doctorat, Université de Annaba 2015.

[14] : F.J. RAMAHLEOMIARANTSOA «Diagnostic des système a énergies renouvelables de type éolienne». Thèse de doctorat, Université Pascal Paoli 2014.

[15] : G. DIDIER «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I 2004.

[16] : T. ACHOUR «Diagnostic de défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone à simple cage d'écureuil : étude expérimentale». Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique Juin 2008.

[17] : M. ARHOUDAM et W. ELMAJDOUB « Détection des défauts électriques et mécaniques dans la machine asynchrone par l'analyse du courant statorique ». Licence Professionnelle Electromécanique et Systèmes Automatisés, Université Mohammed V -SOUISSI - RABAT – 2013.

[18] : F. BENABIDA et M. OUADAH «Diagnostic de défauts au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil ». Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique Juin 2006.

[19] : H. CHERIF «Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelette ». Diplôme de MAGISTER, Université du Biskra Soutenu le : 30/09/2014.

[20] : R. MERAD «Outil de diagnostic appliqué a la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil». Diplôme de MAGISTER, Université de Constantine 2005.

[21] : M.SEKLANE «Application de la méthode datamining dans la maintenance des machines tournantes». Pour l'obtention du diplôme de master, Université de Tlemcen 2011.



Annexe

Les fichiers des données ARFF

On a présenté les quatre types de roulement (SKF 6219, SKF 6215, SKF 6322, SKF 7226B)

I Fichier de données de roulement type SKF 6219:

```
@relation 'Analyse spectrale-data'
@attribute 'BCU' {'bon', 'normale','alerte', 'danger'}
@attribute 'Fréquence-6219' {'147','134','102'}
@attribute 'classes' {'Sans','in','ia','id', 'en','ea','ed', 'érn','éra', 'érd'}
@data
'bon',?,'Sans'
'normale','147','in'
'alerte','147','ia'
'danger','147','id'
'normale','134','érn'
'alerte','134','éra'
'danger','134','érd'
'normale','102','en'
'alerte','102','ea'
'danger','102','ed'
```

II Fichier de données de roulement type SKF 6215 :

```
@relation 'Analyse spectrale-data'
@attribute 'BCU' {'bon', 'normale', 'alerte', 'danger'}
@attribute 'Fréquence-6215' {'158','140','112'}
@attribute 'classes' {'Sans','int','ia','id', 'en', 'ea','ed','érn', 'éra', 'érd'}
@data
'bon',?,'Sans'
'normale','158','in'
'alerte','158','ia'
'danger','158','id'
```

'normale','140','é rn'
'alerte','140','éra'
'danger','140','é rd'
'normale','112','en'
'alerte','112','ea'
'danger','112','ed'

III Fichier de données de roulement type SKF 6322 :

```
@relation 'Analyse spectrale-data'  
@attribute 'BCU' {'bon', 'normale', 'alerte','danger'}  
@attribute 'Fréquence-6322' {'121','75','98'}  
@attribute 'classes' {'Sans','in', 'ia','id','en','ea','ed', 'é rn', 'éra','é rd'}  
@data  
'bon',?,'Sans'  
'normale','121','in'  
'alerte','121','ia'  
'danger','121','id'  
'normale','98','é rn'  
'alerte','98','éra'  
'danger','98','é rd'  
'normale','75','en'  
'alerte','75','ea'  
'danger','75','ed'
```

IV Fichier de données de roulement type SKF 7226B :

```
@relation 'Analyse spectrale-data'  
@attribute 'BCU' {'bon','normale','alerte','danger'}  
@attribute 'Fréquence-7226B' {'225','138','171'}  
@attribute 'classes' {'Sans','in', 'ia', 'id', 'en', 'ea','ed','é rn','éra','é rd'}  
@data  
'bon',?,'Sans'
```

'normale','225','in'

'alerte','225','ia'

'danger','225','id'

'normale','138','érn'

'alerte','138','éra'

'danger','138','érd'

'normale','171','en'

'alerte','171','ea'

'danger','171','ed'