

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Tagduda tamegdayt ta Yerfant tazgayrit

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Etudes

MASTER

Filière : **Électromécanique**

Spécialité : **Maintenance Industrielle**

Présenté par :

BAKIRI Rachid

SAIDANI Kenza

Thème

**Pronostic des défauts des éoliennes par la méthode des
réseaux de neurones artificiels**

Mémoire soutenu octobre 2022 devant le jury composé de :

Mr. CHERABI Bilal

MCB

UMMTO

Promoteur

Mr. BOUMRAR Akli

MAA

UMMTO

Président

Mr. YAMANI Noureddine

MCB

UMMTO

Examineur

Remerciements

Nous tenons avant tout à remercier DIEU tout le puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.

Nos vifs remerciements, accompagnés de toute notre gratitude, à notre encadreur Dr CHERABI BILAL pour nous avoir dirigé notre travail.

Nous le remercions aussi pour son prestigieuse aide, sa disponibilité et avis éclairés.

Nous remercions également les membres du jury Mr BOUMRAR Akli et Mr YAMANI Nouredine d'avoir accepté de juger ce travail en nous honorant par leur présence.

Enfin, nous remercions toute personnes ayant intervenue de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

A ma chère maman affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

A mon père adoré. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma sœur et mes frères. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Je n'oublierais jamais les moments que nous avons passé ensemble. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A ma chère amie ma binôme Kenza avec qui j'ai partagé ce travail.

A la mémoire de mon cher ami BOUGHARI Hafid disparu il ya quelque mois.

A tous mes amis surtout samir moumouh et belaid et mes collègues de l'université.

A mes enseignants et professeurs.

Rachid

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A l'être le plus cher de ma vie, ma mère aucune dédicace ne saurait exprimer mes remerciements, je t'offre ce modeste travail en témoignage de tous les sacrifices et l'immense tendresse dont tu as toujours su me combler.

A mon père, qui m'a toujours poussé et motivé durant mon parcours.

A mes chères petites sœurs Thamazight, Thafsouth qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et aider.

A mes chers frères Takfarinas, Syphax pour leurs encouragements.

A la mémoire de mon grand-père disparu trop tôt j'espère que du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve d'amour et de remerciement pour tout le bien qu'il m'a apporté

A mon meilleur ami et binôme Rachid à qui je tiens à souhaiter beaucoup de réussite dans sa vie.

A ma chère amie Hadjila et tous mes amis.

Kenza

Résumé :

L'énergie éolienne est une source d'électricité renouvelable qui permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, donc il s'agit d'une technique de conversion d'énergie par une machine tournante. Comme toutes les autres machines tournantes, l'éolienne peut être menacée par des anomalies qui sont susceptibles de causer des dommages à ses performances ou même de provoquer un arrêt total de l'installation.

Ce mémoire s'appuie sur une stratégie de maintenance conditionnelle basée sur l'élaboration d'un modèle d'intelligence artificielle de pronostic à travers les réseaux de neurones artificiels afin de détecter les pièces et les sous-systèmes qui démontrent une tendance à courte et à moyen terme vers une anomalie de fonctionnement ou un arrêt complet à cause de bris.

L'objectif général de notre travail est de proposer une nouvelle approche de pronostic en s'appuyant sur les données issues de l'analyse vibratoire à travers des capteurs installés au niveau des roulements, et les réseaux de neurones artificiels RNA. L'approche proposée a été développée sur Matlab pour prédire la durée de vie utile résiduelle des roulements dans la boîte de vitesse d'une éolienne.

Mot clé : Machine tournante, éolienne, maintenance conditionnelle, pronostic, roulement, RNA, Matlab.

Abstract:

Wind energy is a renewable source of electricity that transforms the kinetic energy of the wind into electrical energy so it is a technique of energy conversion by a rotating machine. Like all other rotating machines, the wind turbine can be threatened by anomalies that are likely to cause damage to its performance or even to cause a total shutdown of the installation.

This thesis is based on a condition-based maintenance strategy based on the development of an artificial intelligence model of prognosis through artificial neural networks in order to detect parts and subsystems that demonstrate a tendency to short and in the medium term towards an operating anomaly or complete shutdown due to breakage.

The general objective of our work is to propose a new approach to prognosis based on data from vibration analysis through sensors installed at bearing level, and RNA artificial neural networks. The proposed approach was developed on Matlab to predict the remaining useful life of bearings in the gearbox of a wind turbine.

Keyword: Rotating machine, wind turbine, condition based maintenance, prognosis, bearing, RNA, Matlab.

ملخص :

طاقة الرياح هي مصدر متجدد للكهرباء يحول الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية لذا فهي تقنية لتحويل الطاقة بواسطة آلة دوارة. مثل جميع الآلات الدوارة الأخرى ، يمكن أن تتعرض توربينات الرياح للإتلاف من خلال الانحرافات التي من المحتمل أن تسبب ضرراً لأدائها أو حتى تسبب الإغلاق الكامل للتركيب.

تعتمد هذه الأطروحة على استراتيجية الصيانة الشرطية بالاعتماد على تطوير نموذج ذكاء اصطناعي للتنبؤ من خلال الشبكات العصبية الاصطناعية من أجل اكتشاف الأجزاء والأنظمة الفرعية التي تظهر ميلاً إلى حدوث خلل تشغيلي جزئي أو كامل على المدى القصير والمتوسط بسبب الكسر.

الهدف العام من عملنا هو اقتراح نهج جديد للتنبؤ يعتمد على البيانات الناتجة من تحليل الاهتزاز من خلال أجهزة الاستشعار المثبتة على مستوى المحمل والشبكات العصبية الاصطناعية RNA . تم تطوير النهج المقترح على الماتلاب للتنبؤ بالمدة العملية المتبقية للمحامل في علبة التروس لتوربينات الرياح.

الكلمات المفتاحية : آلة دوارة ، توربينات الرياح ، الصيانة الشرطية ، الإنذار ، المحامل الدحرجية ، RNA ، ماتلاب.

Table de matière :

Résumé :	5
Abstract:	5
ملخص:	6
Liste des figures :	10
Liste des tableaux :	13
Les abréviations :	14
Introduction générale:	15
CHAPITRE I :	17
GENERALITES SUR LES EOLIENNES.....	17
I.1 .Introduction :	18
I.2.Historique :	18
I.3.Production de l'énergie électrique :	19
I .3. Les énergies renouvelables :.....	20
I .3.1 : Définition :.....	20
I .3.2.Les différentes sortes d'exploitation :	20
I .3.2.1. L'hydraulique :	20
I .3.2.2. La biomasse :	21
I .3.2.3. La géothermie :	22
I .3.2.4. L'énergie solaire :	23
I .3.2.5. Les éoliennes :	24
I .4. Description d'une éolienne et son fonctionnement :	25
I .4.1 Définition d'une éolienne :	25
I .4.2 : Fonctionnement :	25
I .5.Constitution d'une éolienne :.....	26
I .6.Classification des éoliennes :	29
I .6.1 selon la gamme de puissance :	30
I .6.2 selon l'axe :	30
I .6.2.1.Eoliennes à axe vertical :.....	30
a. Les éoliennes de Darrieus :	31
b. Les éoliennes de Savonius :	31
c. Les éoliennes de Cycloturbine :	32
I .6.2.2. Éoliennes à axe horizontal :.....	32
I .6.3 : Selon l'emplacement :	33

I .6.3.1. Les éoliennes terrestres (on shore) :	33
I .6.3.2. Eolienne maritime (offshore) :	33
I .7.Application des éoliennes :	34
I.8. Capacité mondiale des éoliennes :	34
I .9 L'énergie éolienne en Algérie :	35
I .9.1.L'énergie éolienne a Adrar :	36
I .10. Choix d'un Site éolien :	38
I .11 : Puissance et énergie d'une éolienne :	39
I .12.Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	40
I.12.1 Les avantage:	40
I.12.1.1. Environnementaux :	40
I.12.1.2.Economiques :	40
I.12.1.3.Liés à ce type d'énergie :	40
I.12.2. Inconvénients :	41
I.12.2.1. Environnementaux :	41
I.12.2.2.Economiques :	41
I.12.2.3.Liés à ce type d'énergie :	42
I.13. Systèmes de génération d'électricité :	42
I.13.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone :	42
I.13.2 Systèmes utilisant la machine synchrone :	43
I.13.3. Systèmes utilisant des machines spéciales :	44
I.14. Le vent :	44
I.14.1. Source du vent :	45
I.14.2 Les type de vents :	45
I .14.2.1. Les vents géostrophiques ou globaux :	45
I .14.2.2.Les vents de surface :	45
I .14.2.3.Vents locaux: les brises de mer :	45
I.14.3 Variation de la vitesse du vent :	45
I.15. Conclusion	47
Chapitre II :	48
MAINTENANCE DES EOLIENNES ET IDENTIFICATION DES COMPOSANTES CRITIQUES	48
II.1 Généralité sur la maintenance :	49
II.1.1. Introduction :	49
II.1.2. Définition du la maintenance :	49

II.1.3. Les 5 niveaux de maintenance :	50
II.1.5. Les 3 échelons de maintenance:	51
II.1.5.1 La maintenance sur site :	51
II.1.5.2 La maintenance en atelier	51
II.1.5.3 La maintenance chez le constructeur ou une société spécialisée	51
II.1.6 Type de maintenance :	51
II.1.6.1. Maintenance corrective:	52
II.1.6.2. Maintenance préventive :	52
a. Maintenance préventive systématique:	53
b. Maintenance préventive conditionnelle:	54
c. Maintenance préventive prévisionnelle:	55
II.1.7. Objectifs de la maintenance :	55
II.2. Maintenance des éoliennes :	57
II.2.1.Introduction :	57
II.2.2. Type et cause défaillances des composants critiques des éoliennes :	57
II.2.2.1.Défaillances des boîtes de vitesses :	57
II.2.2.2.Défaillances des générateurs :	58
II.2.2.3.Défaillances des pales :	59
II.2.2.4. Les défaillances hydrauliques :	60
II.2.3. Revue des analyses de criticité des composantes principales d'éoliennes :	62
II.2.3.1. Étude Suédoise :	62
II.2.3.2. Étude Portugaise :	62
II.2.3.3 Étude Finlandaise :	63
II.2.3.4. Étude Allemande :	64
II.2.4. Identification des sous-systèmes critiques issue de l'utilisation de la méthode pieu	65
II.2.4.1.Présentation de la démarche suivie :	65
II.2.5. Choix de type de maintenance des éoliennes :	67
II.2.6.Technique de maintenance conditionnelle	69
II.2.6.1. Analyse des vibrations :	69
II.2.6.2. Thermographie infrarouge :	69
II.2.6.3. L'analyse des mesures ultrasonores :	70
II.2.6.4. L'analyse d'huiles :	70
II.2.6.5. L'analyse acoustique :	71
II.2.6.6. Le contrôle par ultrasons :	71

II.2.7. Différents types de la maintenance conditionnelle	73
II.2.7.1. Maintenance conditionnelle off-line :	73
II.2.7.2. Maintenance conditionnelle on-line :	73
II.2.8. Mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle :	73
II.2.9. Conclusion :	75
CHAPITRE III :	76
PRONOSTIQUE DES DEFAUTS DES ROULEMENTS PAR « RNA »	76
III. Introduction :	77
III.1 Les roulements :	78
III.1. 1. Définition :	78
III.1.2. Principaux types de roulements :	79
III.1.2.1. Roulements à une rangée de billes à contact oblique :	79
III.1.2.2. Roulements à rotule sur deux rangées de billes :	80
III.1.2.3. Roulements à une rangée de rouleaux cylindriques :	81
III.1.2.4. Roulements à deux rangées de rouleaux cylindriques :	82
III.1.2.5. Roulements à aiguilles :	82
III.1.2.6. Roulements à rouleaux coniques :	83
III.2 : généralités sur la pronostic/diagnostic :	86
III.2.1. Terminologie de base liée au diagnostic/pronostic :	86
III.2.2. Prognostic and Health Management" (PHM):	86
III.2.3. Architecture du PHM :	87
III.2.4. Description des étapes de l'architecture PHM :	89
III.2.5. Diagnostic et pronostic :	89
III.2.5.1. Définition de pronostic :	89
III.2.5.2. définition de diagnostic :	89
III.2.5.3. Méthodes de diagnostic.....	90
III.2.6. Lien entre pronostic et diagnostic :	91
III.2.7. Classification des méthodes de pronostic :	91
III.2.7.1. Pronostic basé sur un modèle physique :	93
a. Les avantages de cette méthode :	93
b. Les inconvénients de cette méthode :	93
III.2.7.2. Pronostic basé sur l'expérience :	94
a. Les avantages de cette méthode :	94
b. Les inconvenants de cette méthode	94

III.2.7.3. Pronostic orienté données :	94
a. Technique statistique :	95
b. Approche par analyse des séries temporelles :	95
c. Techniques de régression :	96
d. Autorégressif moyenne mobile intégrée (ARIMA) :	96
e. Approches à base intelligences artificielle :	96
III.2.7.3.1. Avantages et inconvénients de cette méthode :	97
III.3: pronostic des roulements avec la méthode des Réseaux Neurones Artificiels :	98
III.3.1. Le neurone :	98
III.3.2 Définition de réseaux de neurones artificiels :	98
III.3.3 Qu'est-ce qu'un réseau de neurone artificiel ?	98
III.3.4 Principe du neurone artificiel :	99
III.3.5 Structure d'interconnexion des RNA :	100
III.3.5.1 Réseau multicouche :	100
III.3.5.2 Réseau à connexions locales :	100
III.3.5.3 Réseau à connexions complexes :	101
III.3.6 Architectures d'un réseau de neurones artificiels :	101
III.3.6.1 Réseaux Propagation vers l'avant « Feed forward » (statique) :	102
III.3.6.2 Les réseaux de neurones récurrents « feed-back » (dynamiques) :	102
III.3.6.3 Les réseaux de neurones à résonance :	103
III.3.6.4 Les réseaux de neurones auto-organisés :	103
III.3.7 Apprentissage des réseaux de neurones :	104
III.3.7.1 Type d'apprentissage :	105
a. Apprentissage supervisé :	106
b. Apprentissage renforcé :	106
c. Apprentissage non supervisé :	106
III.3.8. Conception d'un réseau de neurones :	107
III.3.8.1 Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones :	107
III.3.8.2. Choix et préparation des échantillons :	108
III.3.8.3. Elaboration de la structure du réseau :	108
a. Nombre de couches cachées :	108
b. Nombre de neurones cachés :	109
III.3.8.4 La réalisation de l'apprentissage :	109
III.3.8.5 Validation et Tests :	109

III.3.9. Comportement du neurone artificiel :	111
III.3.10. Application des réseaux de neurones :	112
III.3.11. Avantages et inconvénients des réseaux de neurones :	112
III.3.11.1. Avantage des réseaux de neurones :	112
III.3.11.2. Inconvénients des réseaux de neurones :	112
Chapitre IV :	114
Simulation MATLAB	114
Conclusion générale.....	125
Annexe : résultats de simulation MATLAB	127
Annexe 1 :	127
Annexe 2 :	127
Annexe3 :	128
Bibliographie :	130
Webographie :	132

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1: Moulin à vent.....	20
Figure I.2 : Moulin à vent à voile.....	20
Figure I.4: Centrale hydroélectrique	22
Figure I.5 : schéma de l'énergie géothermique	24
Figure I.6 : schéma de la biomasse	25
Figure I.7 Photo d'une centrale éolienne.....	26
Figure I.8 : La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale.....	26
Figure I.9 : le fonctionnement général d'une éolienne.....	28
Figure I.10 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une éolienne.....	29
Figure I.11 : Schéma constitution d'une éolienne	31
Figure I.12 : éolienne de Darrieus.....	33
Figure I.13 Eolienne de Savonius	33
Figure I.14 Les éoliennes de Cycloturbine.....	34
Figure I.15 éoliennes à axe horizontal.....	35
Figure I.16: Capacité éolienne cumulée en GW dans le monde de 1996 à 2014.....	37
Figure I .17 La plus grande éolienne en Algérie	38
Figure I.18 : vitesse vent de l'Algérie.....	39
Figure I.19 : vitesse du vent à Adrar.....	40
Figure I.20 : la ferme éolienne d'Adrar (Kabertène)	41
Figure I .21 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.....	46
Figure I .22 représente les caractéristique couple/vitesse d'une machine synchrone.....	47

Chapitre II

Figure II.1 : conteneur de la fonction de maintenance	53
Figure II.2 : Type de maintenance.....	55
Figure II.3 : Cycle de maintenance préventive systématique	56
Figure II.4 : schématisation de maintenance conditionnelle.....	57
Figure II.5 : schématisation de maintenance préventive prévisionnelle.....	58
Figure II.6 : schématisation des objectifs de la maintenance.....	59
Figure II.7 : Défaillance d'une dent planétaire de la boîte de vitesse.....	61
Figure II.8 : érosion d'une pale.....	63
Figure II.9 : la fissure d'une pale.....	63
Figure II.10 : Pourcentage d'arrêt par composant de l'éolienne installée au suède.....	66
Figure II.11 : Temps d'arrêt des composants des éoliennes d'un parc éolien au Portugal	66
Figure II.12 : Temps d'arrêt des composantes des éoliennes en Finlande	67
Figure II.13 : Temps d'arrêt des composants d'éoliennes en Allemagne	68
Figure II.14 : Images thermographiques.....	74

CHAPITRE III :

Figure III.1: Eléments de roulement	82
Figure III.2: Roulement à une rangée contact oblique.....	83
Figure III.3: Roulement à rotule de billes à contact oblique. Sur deux rangées de billes.....	84
Figure III.4: Roulement à rangée de rouleaux cylindriques.....	85
Figure III.5: Roulement à deux de rouleaux cylindriques.....	86
Figure III.6: Roulements à aiguilles.....	86
Figure III.7: Roulement à rouleaux conique.....	87
Figure III.8: architecture Prognostic and Health Management.....	92
Figure III.9 : Classification des méthodes de diagnostic	90
Figure III.10 : pronostic vs diagnostique.....	91
Figure III.11 : Classification d'approches de Pronostic.....	92
Figure III.12 : Structure d'un système de pronostic à base d'un modèle.....	93
Figure III.13 : Structure d'un système de pronostic orienté données.....	94
Figure III.14. Neurone artificiel.....	100
Figure III.15. Réseau multicouche classique.....	100
Figure III.16 : Réseau à connexions locales.....	101
Figure III.17 : Réseau à connexions complexes.....	101
Figure III.18 : Réseau de neurones Feed Forward.....	102
Figure III.19: réseaux de neurones récurrents.....	103
Figure III.20 : réseaux de neurones auto-organisés.....	104
Figure III.21. Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itération.....	105
Figure III.22 différentes possibilités de classification des réseaux de neurones.....	107
Figure III.23 : Organigramme de conception d'un réseau de neurones.....	110
Figure III.24 : Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel.....	111

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : classification des éoliennes.....	32
Tableau II .1 : type et mode défaillance de quelque composant d'éolienne.....	63
Tableau II.2 : Liste comparative des éléments critiques par pays.....	67
Tableau II.3 : Grille d'évaluation de la criticité repris.....	69
Tableau II.4 : résultats de la démarche suivie.....	70
Tableau II.5 : comparaison de différent type (méthode) de maintenance.....	71
Tableau II.6 : Principaux avantages et inconvénients des différentes méthodes d'analyse.....	75

Les abréviations :

EnR : Les énergies renouvelables

AFNOR X 60-010 : association française de normalisation en 1994

NF : FD X-60-000 : association française de normalisation en 2016

Ipc : l'intervention préventive conditionnelle.

SKF : Svenska KullagerFabriken, est un groupe multinational suédois (Göteborg)

PHM: Prognostic and Health Management

OSA/CBM: Open System Architecture for Condition-Based-Maintenance.

RUL: Remaining Useful Life

ARIMA : Autorégressives moyenne mobile intégrée.

RNA : Les réseaux de neurones artificiels

IA: intelligences artificielles

MTBF: mean time between failure

RMS: Root Mean Square

Std: standart deviation

SK: spectral kurtosis

Introduction générale

Introduction générale:

L'énergie est au centre des débats depuis quelques années. La consommation énergétique ne cesse de croître, en particulier avec le développement économique significatif de pays très peuplés tels que la Chine et l'Inde. Cette croissance exige parallèlement d'augmenter la production d'énergie, Mais certaines sources peuvent avoir un impact négatif sur la planète, attirant l'attention des scientifiques sur l'énergie propre qui représente à la fois l'environnement le plus adapté non polluant comme les énergies renouvelables (EnR).

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

L'énergie éolienne destinées à convertir une partie de l'énergie cinétique produite du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission dans le but de produire de l'électricité par l'intermédiaire d'une génératrice.

Dans la majorité des systèmes éolienne complexes, certains composants (boîtes de vitesses, générateurs et convertisseurs...) sont considérés comme des éléments critiques, un court-circuit de générateur peut être difficile à prévoir, mais beaucoup d'études se sont concentrées sur les roulements de la boîte de vitesses ou sur l'usure des engrenages .

Un programme de surveillance complet fournit beaucoup de données de diagnostic et de pronostique sur la santé des différents sous-systèmes des éoliennes et surtout les composants critiques. La surveillance des conditions lors du fonctionnement des éoliennes est un élément essentiel dans une stratégie de maintenance efficace on appliquant l'entretien préventif au bon

moment permettra d'économiser de l'argent pour le propriétaire d'un parc éolien, d'autant plus que certains parcs éoliens sont situés à des endroits éloignés , aussi minimiser le temps d'arrêt imprévu, Grâce à l'avancement de la technologie des capteurs, de nombreux fabricants des turbines ont commencé à installer des équipements de surveillance conditionnelle (CBM) qui fournissent des informations sur les système et sous-système sous surveillance ,à l'aide des signaux de ces capteurs on peut estimer l'état physique de la turbine et prendre des décisions concernant les actions de maintenance pour éviter ces pannes imprévu .

Introduction générale

La problématique de ce travail de maîtrise est centrée sur la fiabilité des composants du système éolien. Si les composants les plus critiques pour le système peuvent être identifiés, on aura une indication dans quels domaines se concentrer lors de la planification de la maintenance pour une éolienne ou un parc éolien. En effectuant une étude approfondie des défaillances, on peut découvrir quelles composantes sont susceptibles à être défaillantes, combien de fois elles s'arrêtent et s'il est possible de mesurer l'usure du composant et de cette mesure décider quand effectuer l'entretien.

L'objectif général de ce mémoire est d'élaborer une stratégie de maintenance prédictive afin de détecter les composants et sous-systèmes qui démontrent une tendance à court et à moyen terme vers une anomalie de fonctionnement ou un arrêt complet à cause de bris.

Objectif général a été atteint, à la fin du mémoire, par l'atteinte d'objectifs spécifiques suivants :

- Élaboration d'un modèle de pronostic basé sur des données d'analyse des vibrations à travers des capteurs installés au niveau des roulements et un réseau de neurones artificiels (RNA) pour prédire la durée de vie utile restante des roulements dans les boîtes de vitesses des éoliennes.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre introduit des rappels sur les sources de l'énergie éolienne à travers les EnR.

Le deuxième chapitre présente en première partie un aperçu général sur le contexte de la maintenance industrielle, puis y expose la maintenance des éoliennes en identifiant des composants critiques.

Le troisième chapitre est dédié au roulement et décrit ses types et leurs utilisations en première partie. Ensuite la deuxième partie est une extension de PHM complet en abordant le domaine pronostic par une approche basée sur réseau de neurone artificiel pour les roulements.

Quatrième chapitre présente les résultats de simulation par Matlab et on termine avec une conclusion générale.

CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LES EOLIENNES

I.1 .Introduction :

Le mot éolien vient du grec « Éole », signifiant « rapide ». Ce mot est également utilisé pour nommer les machines qui utilisent cette énergie : les éoliennes.

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

Alors on dit que l'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé est assez bien venté. De tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité.

Il existe deux types d'éoliennes modernes : le système à axe horizontal et à axe vertical. Les plus courants sont celles à axe horizontal

Alors, dans ce qui va suivre nous allons expliquer toutes les généralités concernant les éoliennes.

I.2.Historique :

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

En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. Puis en 1890, le Danois Poul La Cour a développé La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend 72 exemplaires. [1]

Pendant la première moitié du XXe siècle, l'éolien est confronté à la concurrence du charbon, mais les pénuries des deux guerres mondiales permettent de maintenir cette énergie. Alors que le premier parc éolien offshore est créé en mer du Nord par le Danemark, en 1971, la crise pétrolière de 1973 ravive l'intérêt pour le grand éolien. De nombreux pays financent des projets de recherche sur les énergies renouvelables. De nouveaux designs de machines voient le jour, qui réduit considérablement le coût de l'énergie éolienne. [2]



Figure I.1: Moulin à vent.

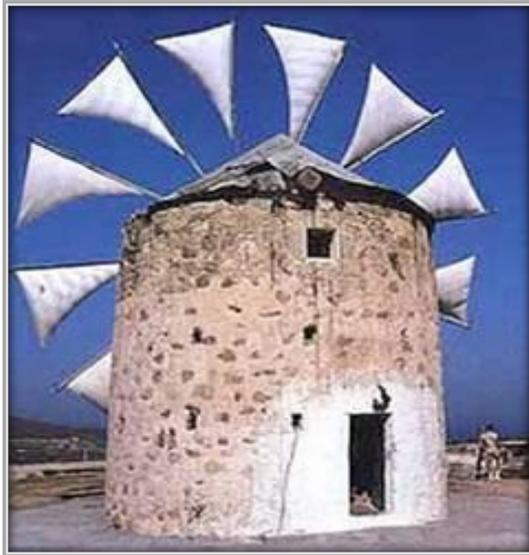


Figure I.2 : Moulin à vent à voile

I.3. Production de l'énergie électrique :

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques transforment différentes sources d'énergie naturelles en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. Le réseau électrique permet de transporter puis de distribuer l'électricité jusqu'aux consommateurs.

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- Les centrales hydroélectriques,
- Les centrales solaires ou photovoltaïques,
- Les centrales éoliennes

Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont :

- Une turbine en mouvement.
- Un alternateur c'est-à-dire un aimant entraîné par la turbine et entouré d'une bobine qui produit le courant électrique. [3]

I.3. Les énergies renouvelables :

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. [3]

I.3.1 : Définition :

Les énergies renouvelables (EnR) sont alimentées par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées... Elles permettent de produire de l'électricité, de la chaleur, du froid, du gaz, du carburant, du combustible. Ces sources d'énergie, considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain, n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles se distinguent des énergies fossiles, polluantes et dont les stocks diminuent. Enfin, les EnR sont plus résilientes, notamment en cas de crise. [30]

I.3.2. Les différentes sortes d'exploitation :

I.3.2.1. L'hydraulique :

Le premier impératif est d'avoir de l'eau, beaucoup d'eau. Le rôle du barrage consistera à la retenir. Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau, sauf en cas de forts débits, qu'il laisse alors passer. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue. Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour amorcer le cycle de production d'électricité. L'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche suivant l'installation, et se dirige vers la centrale hydraulique située en contrebas.

A la sortie de la conduite, la pression ou la vitesse ou les deux en même temps entraîne la rotation de la turbine. La rotation de la turbine entraîne celle du rotor de l'alternateur.

Un transformateur élève alors la tension du courant produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à haute et très haute tension. [31]

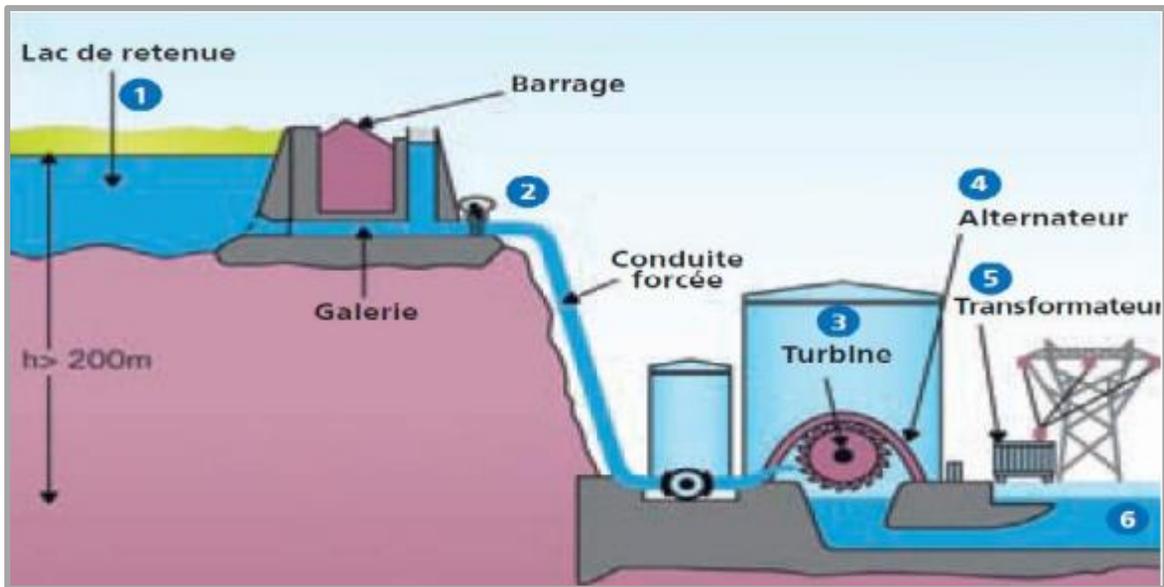


Figure I.3 : Centrale hydroélectrique [31]

I.3.2.2. La biomasse :

Ce concept s'applique aux produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques. On distingue deux types de biomasse :

- **Biomasse sèche** : le bois de feu est la plus ancienne source d'énergie. Les divers déchets ligneux constituent la biomasse sèche et sont également appelés « bois énergie »
- **Biomasse humide** : les déchets organiques d'origine agricole (fumiers, lisiers...), agroalimentaire ou urbaine (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères ...) constituent la biomasse « humide », qui peut être transformée en énergie ou en engrais/amendement [31]

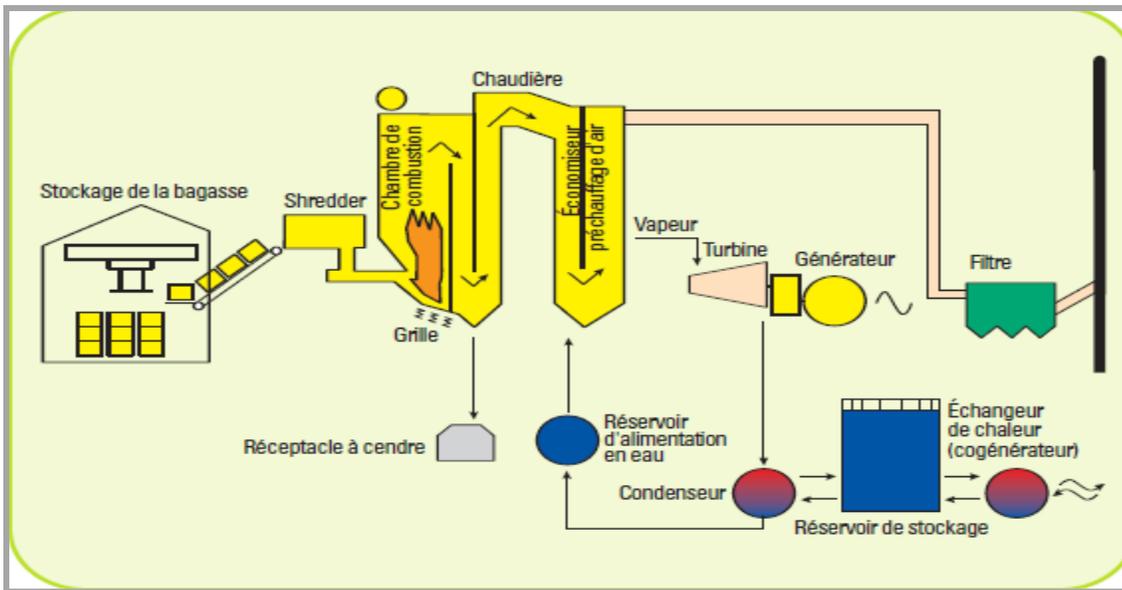


Figure I.4 : schéma de la biomasse [31]

I.3.2.3. La géothermie :

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). Mais tout simplement la chaleur du sol chauffe de l'eau que l'on envoie dans les maisons, ou la chaleur du sous-sol transforme de l'eau en vapeur qui fait tourner une turbine. [31]

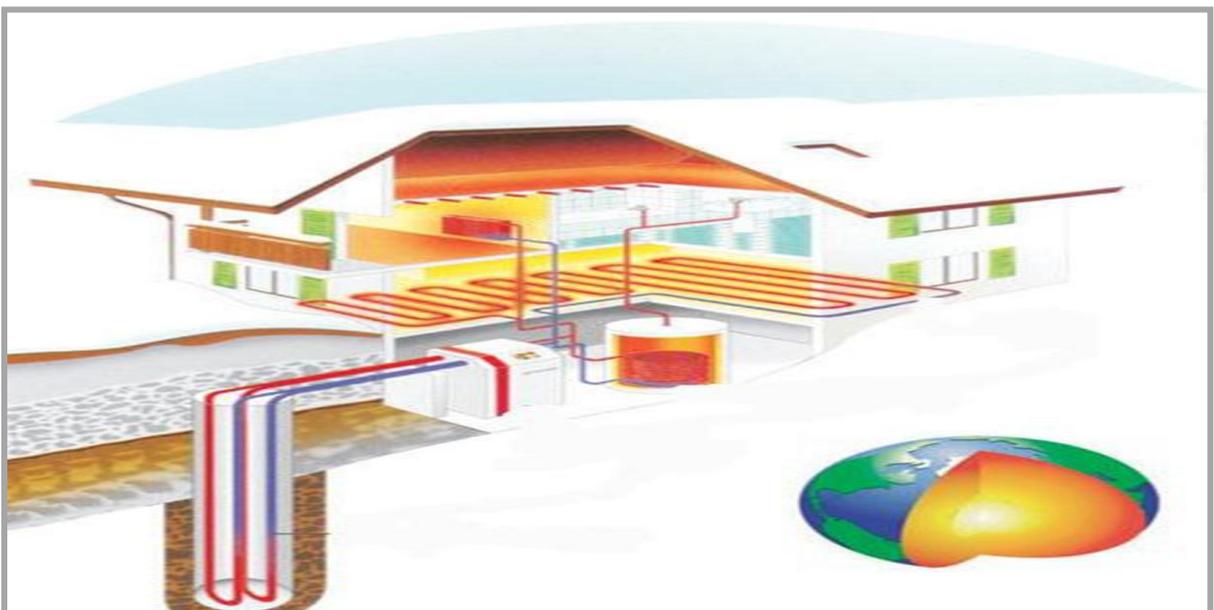


Figure I.5: schéma de l'énergie géothermique [31]

I.3.2.4. L'énergie solaire :

Ces centrales produisent de l'électricité avec l'énergie solaire en utilisant les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux.

Il faut dire que les techniques d'exploitation de l'énergie solaire n'ont cessé de s'améliorer au fil des années. Aujourd'hui, on compte trois types d'énergie solaire catégorisés selon leurs méthodes de production :

- **L'énergie solaire thermique :** Ce type d'énergie est produit à partir de panneaux solaires thermiques qui captent la chaleur du soleil.
- **L'énergie solaire photovoltaïque :** l'énergie solaire photovoltaïque obtenue par l'énergie du rayonnement solaire. Autrement dit, les panneaux photovoltaïques, souvent installés sur le toit, recueillent les photons du soleil et les transforment en électricité. Ces panneaux photovoltaïques sont composés d'une superposition de couches de cellules dont l'une est chargée négativement et l'autre positivement. Dès qu'un photon traverse ces couches, il produit une tension électrique. Il ne reste plus qu'à raccorder un fil à la borne négative et un autre à la borne positive pour exploiter l'électricité produite.
- **L'énergie solaire thermodynamique :** L'énergie solaire thermodynamique, quant à elle, est produite par des centrales solaires à concentration. Cet équipement est composé de miroirs avec des fluides caloporteurs et d'un générateur d'électricité solaire. Tout comme les panneaux solaires thermiques, ces miroirs transforment l'énergie apportée par le rayonnement solaire en chaleur, mais à une température considérablement plus élevée. Cette dernière peut, d'ailleurs, aller de 250 à 800° en fonction des techniques utilisées. La chaleur ainsi obtenue va, ensuite, être convertie en énergie électrique en activant le turbo-alternateur. [31]



Figure I.6 : Photo d'une centrale solaire.

I .3.2.5. Les éoliennes :

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité.

Une éolienne produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.



Figure I.7 : Photo d'une centrale éolienne

Généralités sur les éoliennes

Aujourd'hui, les énergies renouvelables représentent 13,5% de la consommation totale d'énergie comptabilisée dans le monde et 18% de la production mondiale d'électricité. La biomasse assure l'essentiel de cette production (10,6%). La production électrique renouvelable provient principalement de l'hydraulique 90%.

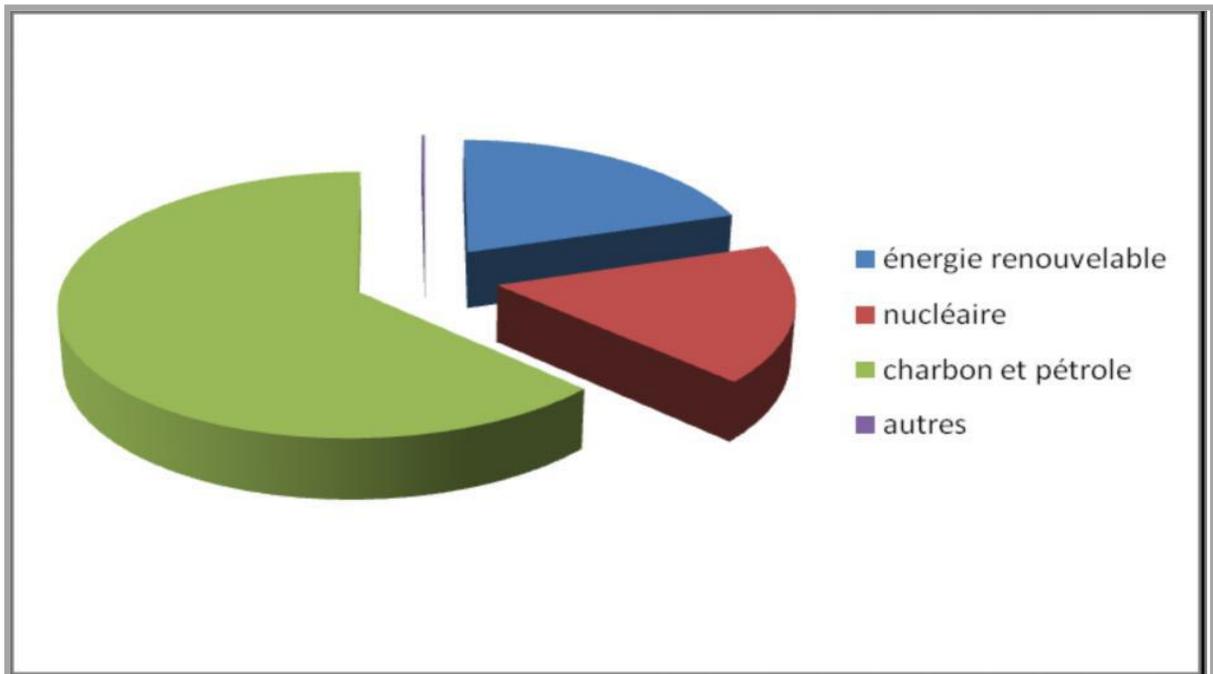


Figure I.8 : La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale.

I.4. Description d'une éolienne et son fonctionnement :

I.4.1 Définition d'une éolienne :

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. [4]

I.4.2 : Fonctionnement :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

- au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique.

Généralités sur les éoliennes

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), l'automate, renseigné par l'anémomètre et la girouette fixés au sommet de la nacelle, donne le signal au moteur d'orientation de placer l'éolienne face au vent.

Le vent entraîne les pales qui font tourner l'arbre lent. Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide, Celui-ci transmet le mouvement rotatif à la génératrice qui produit l'électricité.

Le courant ainsi produit descend au sol par des câbles situés dans le fût de l'éolienne. Il est alors transformé pour être injecté au réseau électrique existant. [2]

Le principe de la conversion éolienne est illustré par la figure (I.9). l'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécanique, électrique ou d'automatique. [4]

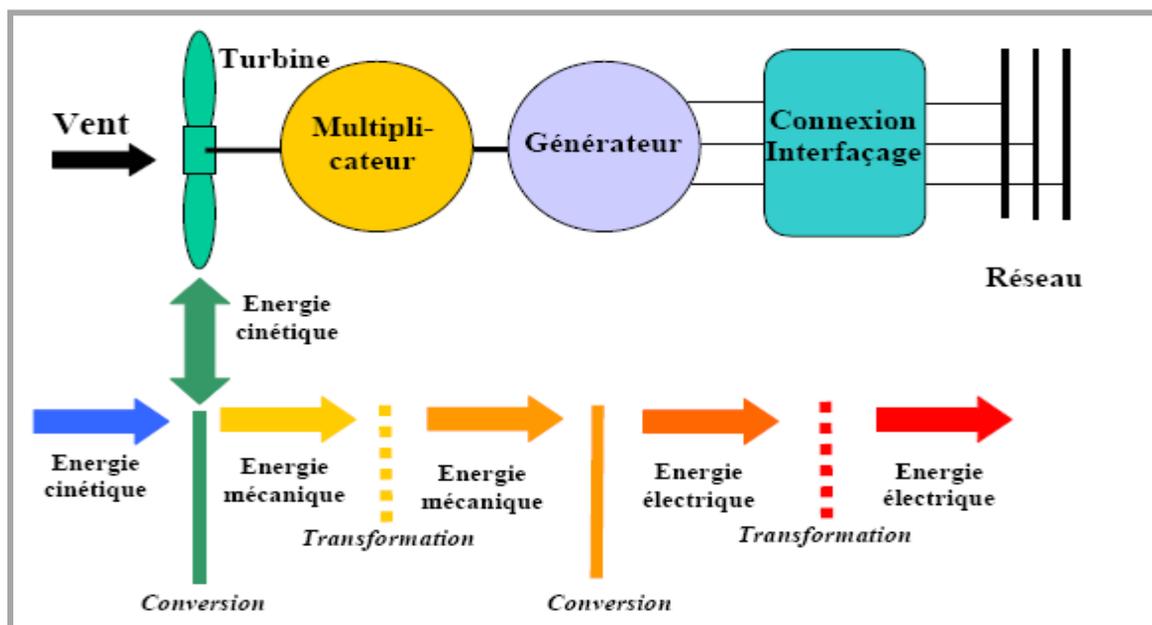


Figure I.9 : le fonctionnement général d'une éolienne [4]

I.5. Constitution d'une éolienne :

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur la figure

I.11

➤ La fondation :

La fondation est généralement conçue en béton. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

Généralités sur les éoliennes

➤ Le mât :

Le mât est plus ou moins imposant selon la force de l'éolienne et est conçu en métal afin d'apporter solidité à l'ensemble. Il supporte les principaux éléments de l'éolienne (la nacelle et le rotor). Certains mâts peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres en hauteur : plus le rotor est haut et plus le rendement de l'éolienne sera bon, les hélices n'étant plus gênées par aucun obstacle. Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.

➤ La nacelle :

La nacelle est le moteur de l'éolienne. C'est à l'intérieur de cet équipement que se trouve le générateur d'électricité qui permet de convertir l'énergie produite par le mouvement de l'hélice en électricité et le reste de la machinerie qui dirige les pales en fonction de la force du vent. Elle supervise ainsi l'éolienne qui peut être arrêtée dès que le vent n'est pas suffisant ou au contraire trop puissant ou dans tout autre cas qui pourrait poser problème.

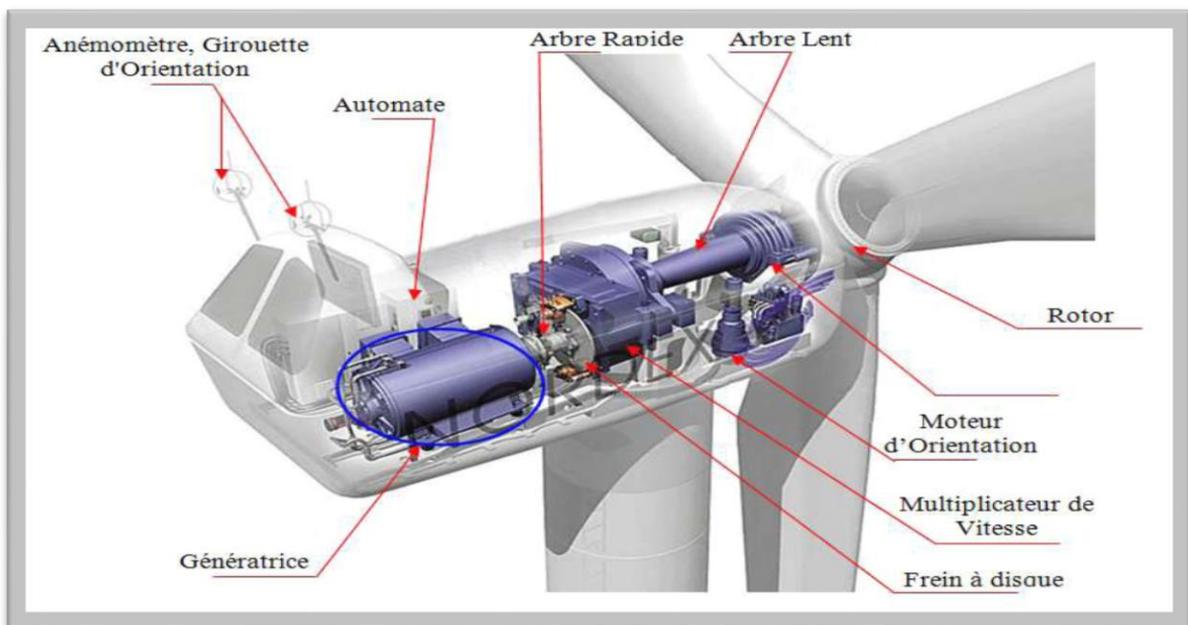


Figure I.10 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une éolienne. [2]

➤ Le rotor :

Composé de trois pales en général et du nez de l'éolienne, il est entraîné par l'énergie du vent et peut être couplé directement ou indirectement à une pompe ou plus généralement à un générateur électrique. Il est lié à la nacelle par le moyeu.

Généralités sur les éoliennes

➤ **La cabine de dispersion :**

Située à la base de l'éolienne permet de se connecter au réseau électrique afin d'y injecter l'électricité produite pour la stocker si elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus.

➤ **Les pales :**

Elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique.

➤ **Le frein :**

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

➤ **Le multiplicateur :**

Augmente la vitesse de rotation d'un second rotor avec un système d'engrenages pour la génératrice électrique.

➤ **La génératrice :**

Transforme l'énergie mécanique de rotation disponible sur la second rotor en énergie électrique.

➤ **Arbre de transmission :**

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage en cas de besoin. Il reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner le générateur électrique à travers le multiplicateur.

➤ **Système de refroidissement :**

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir le générateur un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éolienne comportant un refroidisseur à l'eau

➤ **Système de contrôle :**

C'est un système électrique qui contrôle le mécanisme d'orientation. Il surveille le fonctionnement de l'éolienne, signale et commande l'arrêt de l'éolienne en cas de défaillance. [2]

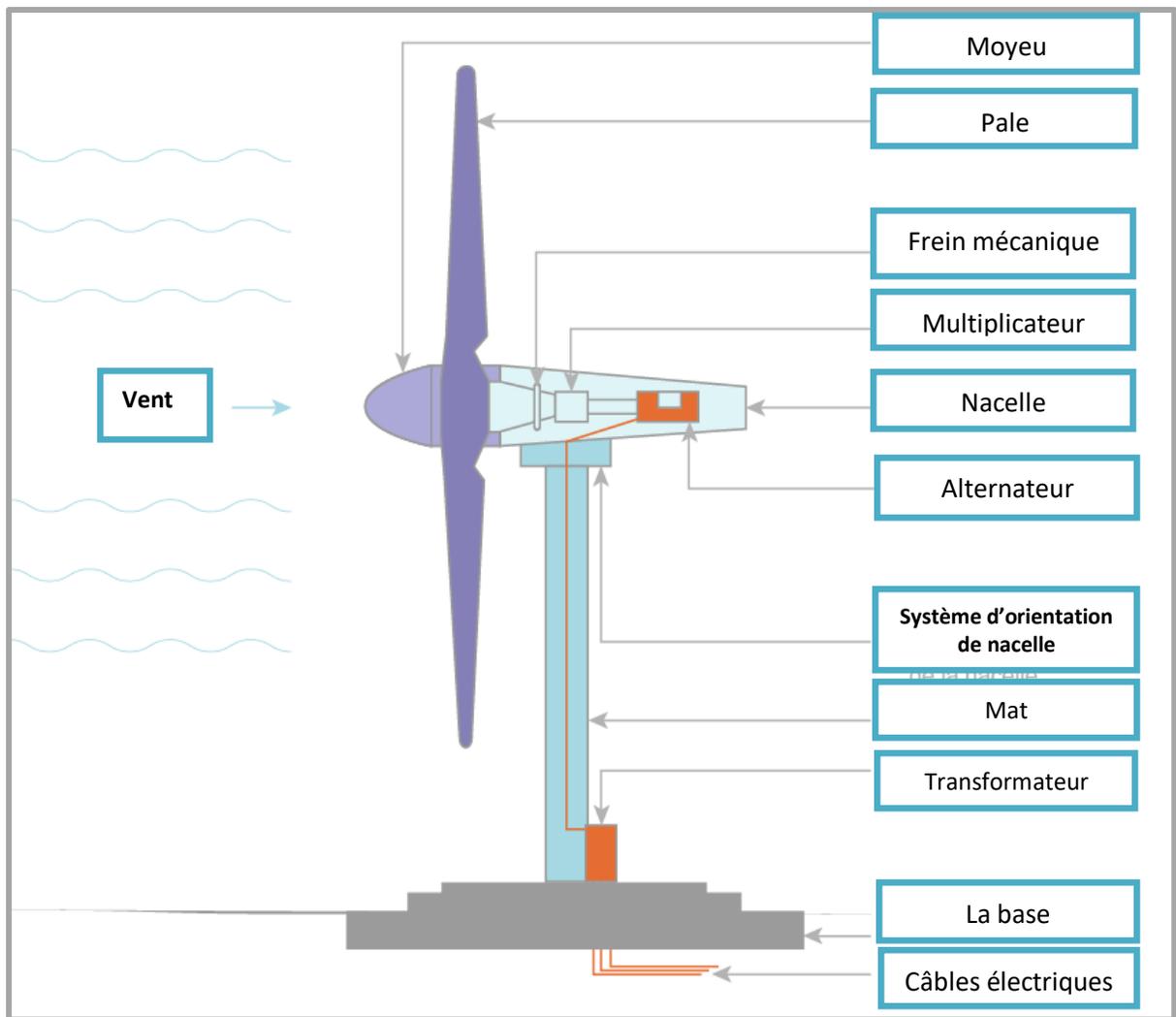


Figure I.11 : Schéma constitution d'une éolienne [2]

I.6. Classification des éoliennes :

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

Les éoliennes sont classées selon plusieurs critères : gammes de puissances, axe horizontal ou vertical, mode de fonctionnement à vitesse fixe ou variable, et aussi selon l'emplacement (sur la terre appelée ONSHORE. sur la mer dite OFFSHORE). [5]

Généralités sur les éoliennes

I .6.1 selon la gamme de puissance :

Selon la gamme de puissance nominale produite par l'aérogénérateur, les éoliennes sont divisées en trois catégories. [5]

Le tableau suivant donne un résumé sur les ces trois catégories :

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite puissance	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne puissance	12m à 45 m	40 KW à 1 MW
Grande puissance	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I.1. Classification des éoliennes [5]

I .6.2 selon l'axe :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est monté l'hélice. Il existe principalement deux type de turbines éoliennes : à axe vertical et à axe horizontal. [5]

I .6.2.1.Eoliennes à axe vertical :

L'éolien à axe vertical est pourvu d'un rotor dont l'axe de rotation est globalement perpendiculaire au flux du fluide, et donc bien souvent vertical. La technologie existe depuis le début du XXème siècle et regroupe différentes technologies : Darrieus, Savonius, Cycloturbine...

Les propriétés de ces éoliennes (silence, simplicité d'entretien, tolérance aux vents variables) les rendent particulièrement adaptées pour les éoliennes domestiques ou les éoliennes pour l'autoconsommation.

Le principe essentiel de ces systèmes dits "à axe vertical" est de convertir la puissance mécanique du flux par un mouvement d'un solide, le rotor, qui tourne sur un axe globalement orthogonal à la vectrice vitesse du flux d'air. Cette particularité rend le système isotrope quel que soit la direction du flux du fluide dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

On peut lister trois grandes familles d'éoliennes à axe vertical : [2]

a. Les éoliennes de Darrieus :

Équipées de pales profilées comme des ailes d'avion. L'aérodynamique des pales génère une portance, à l'identique d'une aile d'avion, ou d'une hélice. Le système permet d'orienter la portance de la pale dans la direction du mouvement mécanique de celle-ci, et donc de générer un travail mécanique. L'aérodynamique de la pale est efficace et requiert la maîtrise de l'aérodynamique moderne. [2]

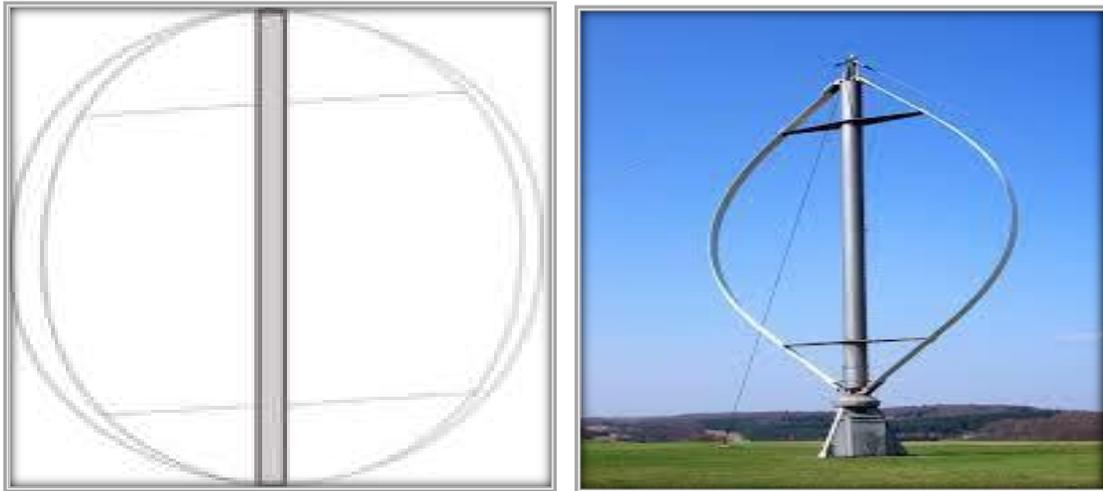


Figure I.12 : éolienne de Darrieus [2]

b. Les éoliennes de Savonius :

Équipées de deux coques arrondies et emboîtées. Les pales génèrent une traînée différente selon qu'elles descendent le vent ou le remonte. Cette variation de traînée génère le couple qui anime l'éolienne. Plus simple de conception, cette machine est moins performante, les rendements de ces machines restent très limités. Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante. [2]

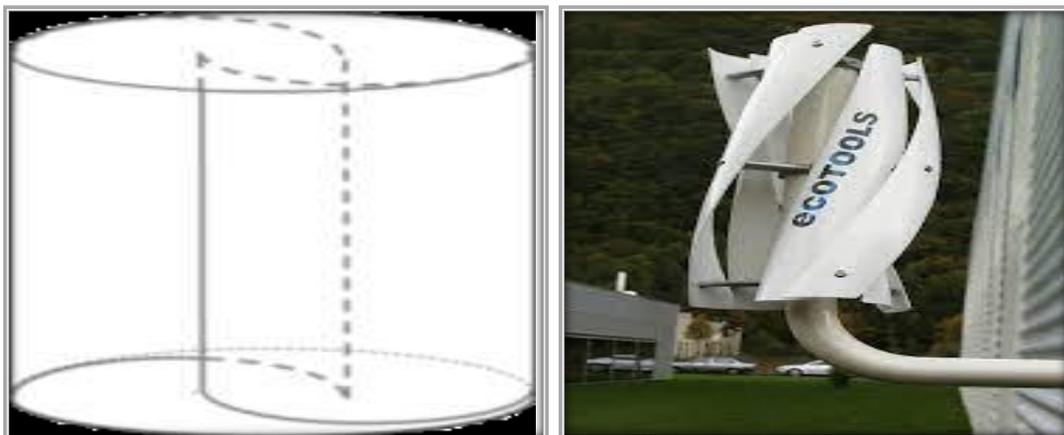


Figure I.13 Eolienne de Savonius [2]

C. Les éoliennes de Cycloturbine :

Équipées d'un rotor dont certaines pièces sont mobiles, permettent d'orienter les pales en fonction de l'azimut de la pale. [2]

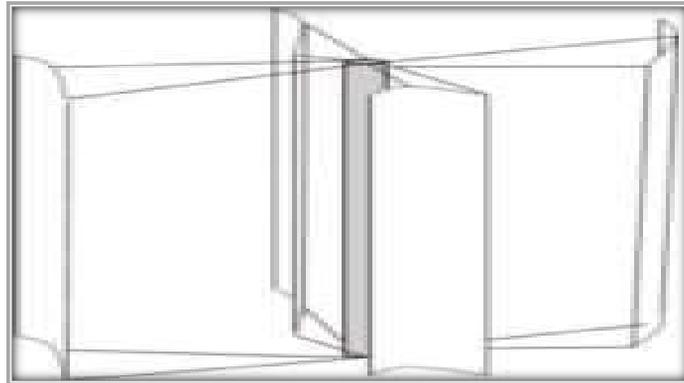


Figure I.14 Les éoliennes de Cycloturbine [2]

I.6.2.2. Éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées. L'éolienne horizontale est le type d'éolienne le plus « classique ». Cette éolienne capte le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélice. Ces pales tournent autour d'un mât qui se situe horizontalement par rapport au sol, ce qui explique le nom de cette éolienne.

Dans ce type d'éolienne, la force des hélices en rotation permet d'actionner un générateur qui est situé sur le haut de l'éolienne. Le grand avantage de cette éolienne est son rendement, notamment quand elle comprend un système d'orientation des pales en fonction du vent. Ces éoliennes sont également jugées plus solides et engendrent de faibles coûts d'entretien. L'inconvénient principal de ces éoliennes est le bruit qu'elles engendrent. De plus, la complexité d'installation en fonction de la hauteur du mât est à prendre en compte au moment d'opter pour ce mécanisme.

- Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:
 - **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
 - **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. [4]

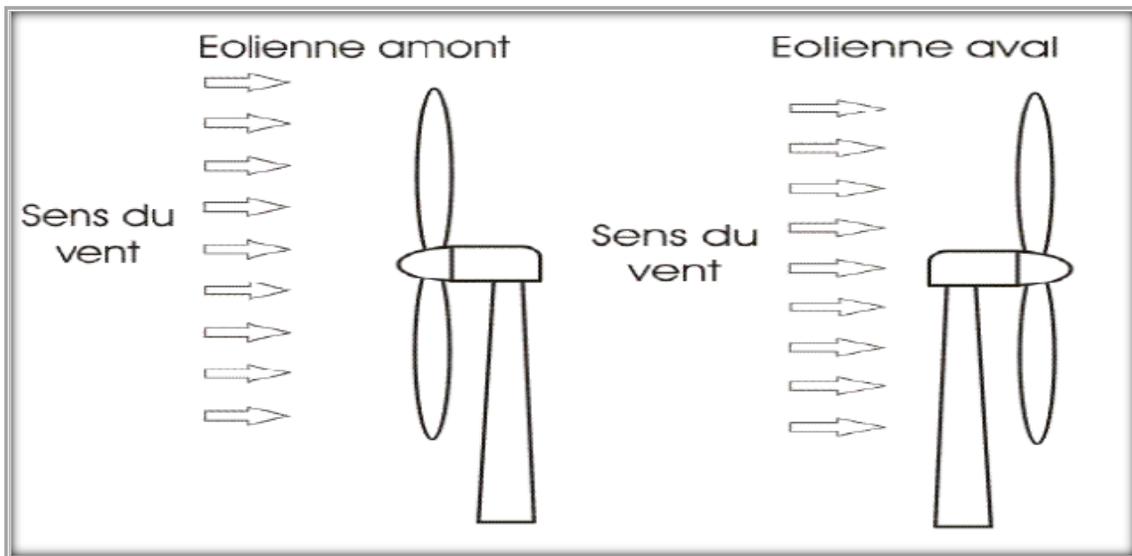


Figure I.15 éoliennes à axe horizontal. [4]

I.6.3 : Selon l'emplacement :

On trouve deux types d'éoliennes selon les lieux d'emplacement.

I.6.3.1. Les éoliennes terrestres (on shore) :

Les éoliennes terrestres, dites on shore, sont installées sur la terre, au contraire des éoliennes offshore, déployées en mer. L'énergie électrique produite par une éolienne varie en fonction de trois paramètres essentiels : la forme et la longueur des pales, la vitesse du vent et la température qui modifie la densité de l'air. [2]

I.6.3.2. Eolienne maritime (offshore) :

Une éolienne offshore, c'est à dire installée en mer, permet de convertir la force du vent en électricité. Le terme anglais « offshore » signifie littéralement « hors côtes », par opposition aux éoliennes terrestres ou « on shore ». Les éoliennes offshore fonctionnent selon le même principe que les modèles terrestres traditionnels : elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut également la qualifier d'aérogénérateur. [2]

I.7. Application des éoliennes :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique

Dans le cas de production d'énergie électrique on peut distinguer deux types de configuration :

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution. On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. [2]

I.8. Capacité mondiale des éoliennes :

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte dans tous les pays du monde. C'est le secteur électrique dynamisé qui enregistre la croissance la plus forte augmentation en termes de capacité mondiale de production d'énergie éolienne de 1997 ~2015. Des installations record d'énergie éolienne dans le monde ont été effectuées en 2015.

Bien devant les installations photovoltaïques et les centrales à charbon les installations d'énergie éolienne constituent près de 44,2% du total des nouvelles capacités électriques installées dans l'Union électrique. Fin 2015 (voir **Figure I.16**), l'énergie éolienne installée constitue près de 432.4 GW plus de 63.0 GW par rapport à l'année 2014. Avec en tête la Chine, les États-Unis et l'Allemagne, dont 33.6% en Chine, 17,2% aux États-Unis et 10,4% en Allemagne. Vu que la Chine est dotée d'une loi sur les énergies renouvelables et d'un plan national d'action pour le contrôle de la pollution, ces mesures ont aidé la chine à passer de 0.352 GW de capacité éolienne en 2000 à une capacité de 120 GW en 2015. [6]

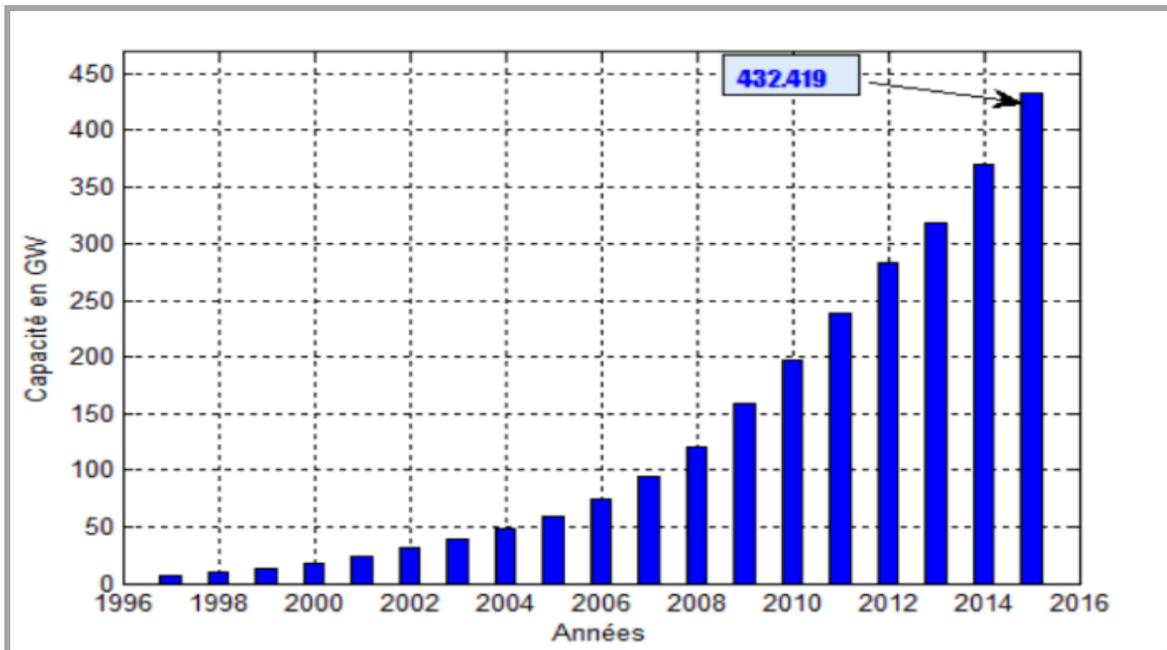


Figure I. 16 : Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes. [6]

I.9 L'énergie éolienne en Algérie :

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU. [7]

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans. [7]

L'Algérie à l'instar des autres pays essaie de percer dans le domaine des EnR et l'énergie éolienne en particulier.



Figure I.17. La plus grande éolienne en Algérie

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

La carte représentée dans la figure (**Figure I.18**) montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar, Concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée, Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qui ne doit pas être négligé, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. [7]

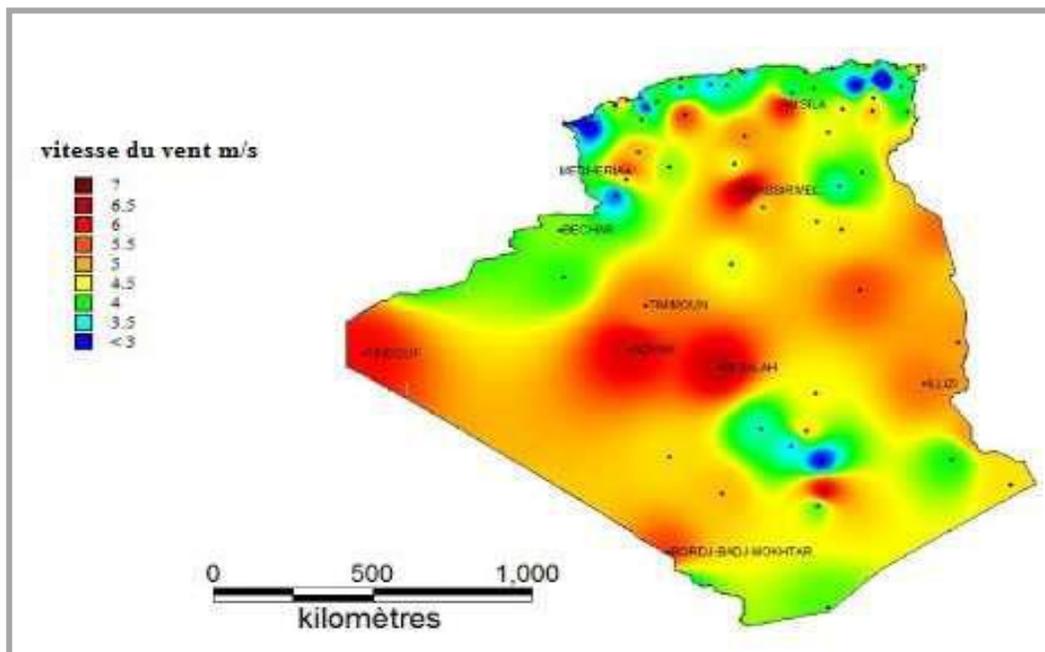


Figure I.18. vitesse annuel du vent en l'Algérie

I.9.1.L'énergie éolienne a Adrar :

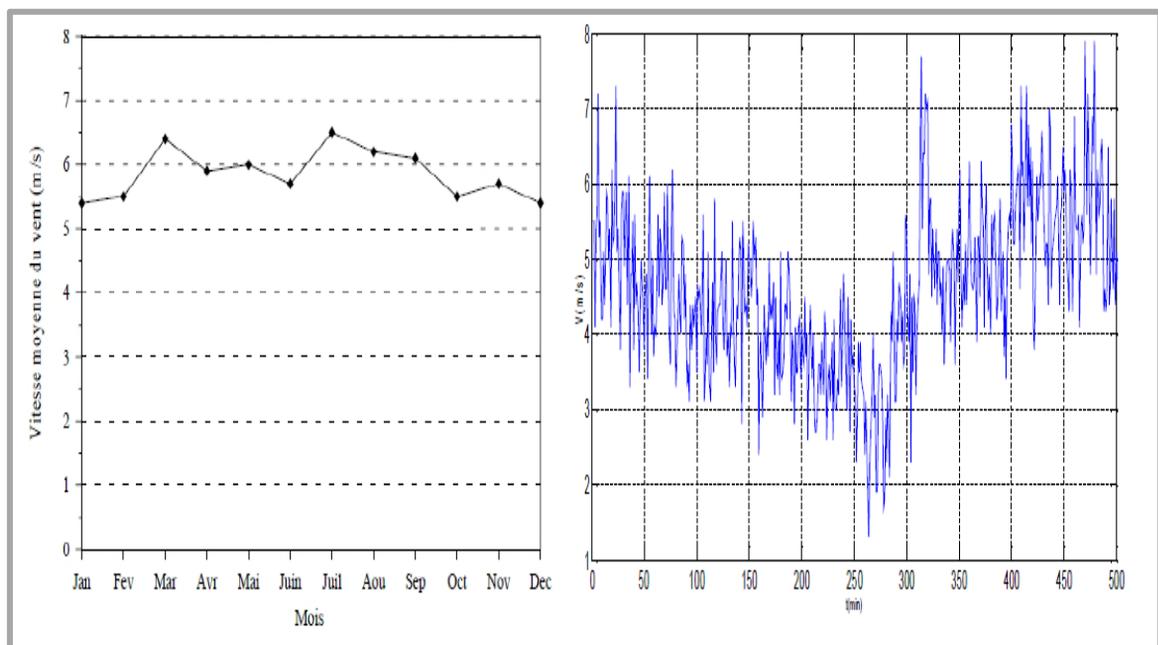
Dans le cadre de la réalisation d'une ferme éolienne de 10 MW, la région d'Adrar a été choisie suite à l'observation des mesures effectuées par l'Office National de la Météorologie (ONM) qui ont montré que cette région présente l'un des meilleurs potentiels éoliens en Algérie.

La ville d'Adrar se trouve au Sud Ouest de l'Algérie. La région est caractérisée par sa topographie relativement plate, ainsi que par une géomorphologie désertique. Adrar et ses

Généralités sur les éoliennes

alentours sont caractérisés par un fort potentiel de vent venant du Nord Est. Les données de vent de la région d'Adrar classent cette dernière comme celle présentant le meilleur potentiel de vent en Algérie.

La station de mesure est placée à l'aéroport d'Adrar, ses coordonnées géographiques sont $27,82^{\circ}\text{N}$ et $-0,18^{\circ}\text{E}$; l'anémomètre est placé à une hauteur de 10 mètres. Les mesures disponibles sont des mesures horaires effectuées sur une période de six années (2003 - 2008). Elles ont permis de tracer les variations journalières, mensuelle et annuelle de la vitesse moyenne du vent. [5]



(a) Vitesse moyenne annuelle du vent du site D'Adrar (b) vitesse du vent mesurée au 30 janvier 2014 à Adrar

Figure I.19 vitesse du vent à Adrar [5]

La définition des sites a été basée sur les éléments décisifs de choix de site et aussi sur la proximité des postes électriques de Sonelgaz. Deux sites ont été recensés. Mais un seul a eu l'approbation des autorités compétentes pour l'installation de la ferme, c'est le site de Kabertène, ce site se trouve à environ 73 km au Nord de la ville d'Adrar à proximité d'un poste électrique de Sonelgaz. Il se trouve à une altitude d'environ 260 m.

Le site présente des possibilités idéales pour le transport. En effet, il se trouve près de l'axe routier Adrar – Timimoune. Un autre avantage est que ce site se trouve à proximité d'un poste très haute tension et haute tension (THT-HT), et de ce fait l'extension nécessaire afin de raccorder le parc au poste est limitée, ce qui réduit les coûts de construction. Aussi La

superficie disponible est importante. La topographie est plate et la rugosité du terrain est faible. Mis à part le poste et les poteaux électriques, aucun obstacle ne se trouve dans les alentours de ce site.



Figure I.20: la ferme éolienne d'Adrar (Kabertène)

I .10. Choix d'un Site éolien :

Un projet éolien ne peut se faire n'importe où. Le choix d'un site naît de la convergence de plusieurs critères : réglementaires, techniques mais aussi le contexte humain et les enjeux territoriaux. [10]

Le choix des meilleurs sites se fait au moyen des critères suivants :

- Des variations annuelles, saisonnières et journalières pas trop importantes
- Une vitesse moyenne de vent élevé.
- Des sites suffisamment éloignés des obstacles tels les immeubles ou les grands arbres.
- Des niveaux de turbulence faibles pour évites des ruptures d'hélice
- Des collines à pente douce ne comportant pas des pics aigus ou de crêtes dentelées et ayant
- une faible rugosité [2]

Généralités sur les éoliennes

I.11 : Puissance et énergie d'une éolienne :

L'éolienne tire son énergie de l'énergie cinétique du vent. L'énergie cinétique du vent dépend de sa masse et de sa vitesse.

La puissance potentielle se calcule en watt (W) ou en kW (1 kW = 1 000 W). L'énergie se calcule en fonction du temps en W-heure (ou kWh) : 1 kW de puissance délivrée pendant une heure donne 1 kWh.

Les éléments qui déterminent la puissance de sortie (kWh produits) d'une éolienne sont :

- la vitesse du vent ;
- le diamètre du rotor ;
- la masse de l'air ;
- le nombre et la forme de pales ;
- le rendement mécanique du rotor vers l'axe de la génératrice ;
- le rendement électrique de la génératrice ;
- la limite de Betz qui est égale à 0.59 (59%)

En liant ces deux formules, le calcul de la puissance peut s'exprimer par une formule simplifiée :

$$P = 1/2 * \rho * S * V \dots\dots I.1$$

Dans laquelle :

- P est la puissance (en W) ;
- S est la surface du cercle de rayon égal à la longueur d'une pale.
- V est la vitesse du vent (en m/s).
- ρ (Rho) est la masse volumique (le "poids") de l'air.

La puissance utile dépend aussi des performances du rotor et du générateur et de leur perte mécanique et électrique. Le meilleur rendement est de 60 à 65 %, mais certaines éoliennes ont des rendements de 30 à 50%, ceci est dû à:

- Les pertes mécaniques proviennent de la conversion d'énergie du rotor vers la génératrice.
- Les pertes électriques du générateur. [27]

I.12. Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.12.1 Les avantages:

L'énergie éolienne a de nombreux avantages dont, par exemple :

I.12.1.1. Environnementaux :

- ✓ C'est une énergie durable (il y aura toujours du vent) et propre. Elle ne nécessite aucun carburant.
- ✓ Elle ne crée pas de gaz à effet de serre ou moins. Car il ne faut pas oublier que lors de la construction de l'éolienne, du montage de celle-ci, de son transport ainsi que d'éventuelles infrastructures à construire (route par exemple). Des gaz à effet de serre sont créés. Il faut donc comparer cela avec l'économie de CO₂ réalisée avec une éolienne.
- ✓ Une éolienne seule ne prend pas énormément de place au niveau du sol. Car seul le mât dérange. Il est donc possible d'utiliser le restant du terrain.
- ✓ Une éolienne est construite avec du métal et du plastique. Ce ne sont donc pas des matières toxiques ou radioactives. De plus, toutes les parties en acier sont recyclables. Elle est entièrement démontable et certaines parties (le mât) seraient réutilisables. Elle ne laisse donc aucun produit toxique et peut être remplacée facilement. [4]

I.12.1.2. Economiques :

- ✓ Les coûts de fonctionnement sont faibles, il n'y a aucun coût variable (pas d'achat de matière première pour pouvoir produire l'énergie, le vent est gratuit). La technologie est assez simple, une éolienne est donc fiable.
- ✓ Avec la recherche et le développement, ainsi que l'augmentation de la capacité de production des éoliennes, on remarque une économie d'échelle. Le coût du courant produit va donc diminuer dans le futur.
- ✓ Les parcs éoliens attirent les touristes. L'Allemagne, le Danemark et maintenant la France organisent des visites de parcs. [4]

I.12.1.3. Liés à ce type d'énergie :

L'énergie éolienne est une bonne source d'appoint. Par exemple l'hiver, pendant les pics de consommation, moment où il y a le plus de vent, cette énergie est un bon complément. La production est la plus importante pendant l'hiver ce qui correspond à la période de l'année où la demande est la plus forte.

Généralités sur les éoliennes

Pour des lieux isolés (montagne) il est possible de mettre de petites éoliennes pour alimenter en courant électrique les maisons se situant dans ces endroits.

Pour cette raison, les soutiens financiers pour l'énergie éolienne, accordés aussi par des pays économiquement libéraux comme la Grande-Bretagne ou les Etats-Unis, sont considérés comme des investissements dans une future technologie compétitive et non pas comme des subventions. [4]

I.12.2. Inconvénients :

Il subsiste pourtant toujours des facteurs qui freinent l'implantation des éoliennes :

I.12.2.1. Environnementaux :

- ✓ L'aspect esthétique est souvent mis dans les inconvénients. On craint souvent la dégradation visuelle du site où seront installées les éoliennes.
- ✓ Le bruit est aussi cité comme inconvénient, bien que les nouveaux constructeurs fassent tout pour le limiter.
- ✓ Pour l'aviation, des flashes sont émis depuis le haut des mâts toutes les cinq secondes. Ce qui pourrait déranger les habitants proches des éoliennes.
- ✓ Il y aurait un risque mortel pour les oiseaux et pour les chauves-souris. En cas de mauvais temps ou pendant la nuit, les oiseaux pourraient entrer en collision avec les pales.
- ✓ En cas de tempête, l'éolienne doit se bloquer, mais il arrive que le système ne fonctionne pas et que l'éolienne explose. Ces cas sont rares, et il n'y a jamais eu de dégâts pour les habitations alentours. [4]

I.12.2.2. Economiques :

- ✓ La production d'électricité représente 20 à 40 % de la puissance installée. Ce pourcentage varie en fonction des régions et de la force du vent. Le délai de récupération des capitaux investi sera donc plus long et il y a immobilisation des capitaux.
- ✓ L'aspect esthétique et le bruit pourraient diminuer la valeur des terrains et des biens fonciers à proximité des éoliennes.
- ✓ Les ondes hertziennes peuvent être perturbées (problème pour les télévisions) mais souvent les sociétés mettant en place des éoliennes financent la construction d'un nouvel émetteur.

Généralités sur les éoliennes

- ✓ Les éoliennes constituent un obstacle pour les ondes. Elles peuvent donc interférer avec les radars comme les radars météorologiques. [4]

I.12.2.3.Liés à ce type d'énergie :

- ✓ La production d'électricité dépend du vent. Il n'est donc pas possible de gérer la production en fonction des besoins. Si l'éolienne est autonome elle doit avoir un système de stockage ou compléter le système avec un groupe électrogène.
- ✓ Les systèmes de stockage pour les grandes quantités (MW) d'électricité restent coûteux et compliqués à mettre en place.
- ✓ Concernant les éoliennes reliées au réseau, il n'est pas possible de répondre à la demande seulement avec ce type d'énergie, car il est nécessaire de coupler avec des centrales classiques pour pouvoir garantir un flux constant.
- ✓ Il y a un problème dû au manque de place pour implanter les éoliennes nécessaires pour combler les besoins. Cela est tout simplement impossible. L'énergie éolienne restera donc une énergie d'appoint.
- ✓ Une éolienne crée un effet de sillage de 20 jusqu'à dix fois le diamètre du rotor derrière elle. C'est pour cette raison que deux éoliennes doivent être distantes au minimum de trois fois le diamètre du rotor.
- ✓ Une éolienne est installée dans une zone propice pour ce type d'énergie et donc une zone venteuse. Or ces zones sont parfois éloignées des réseaux électriques, ce qui nécessite un raccordement parfois coûteux. [4]

I.13. Systèmes de génération d'électricité :

Diverses chaînes de production coexistent pour la production d'électricité par aérogénérateurs. Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance, en fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable.

A travers la littérature spécialisée nous avons rencontré plusieurs types de génératrices adaptées aux éoliennes. [4]

Nous avons pu les classer suivant trois variantes citées ci-dessous :

I.13.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone :

Elle représente la configuration la plus répandue dans le monde. Ce type de machine offre la possibilité de travailler à vitesse variable tout en respectant les contraintes de fréquence et de tension.

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écurueil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur. Mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. [8]

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure I .21.

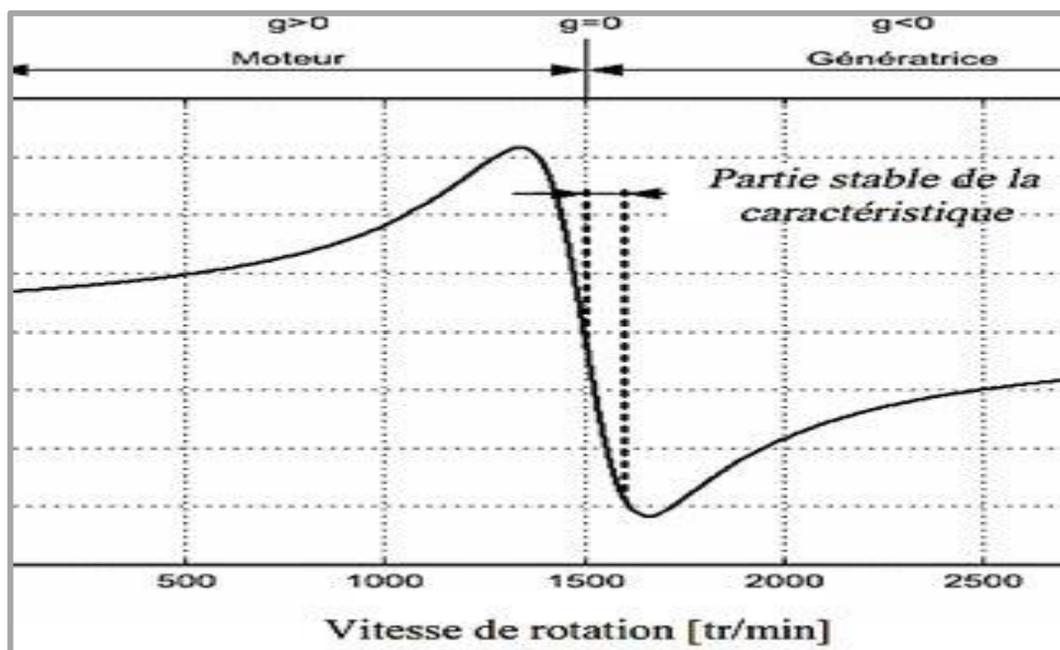


Figure I .21 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles [8]

I.13.2 Systèmes utilisant la machine synchrone :

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de

puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents.

La figure I .22 représente les caractéristique couple/vitesse d'une machine synchrone

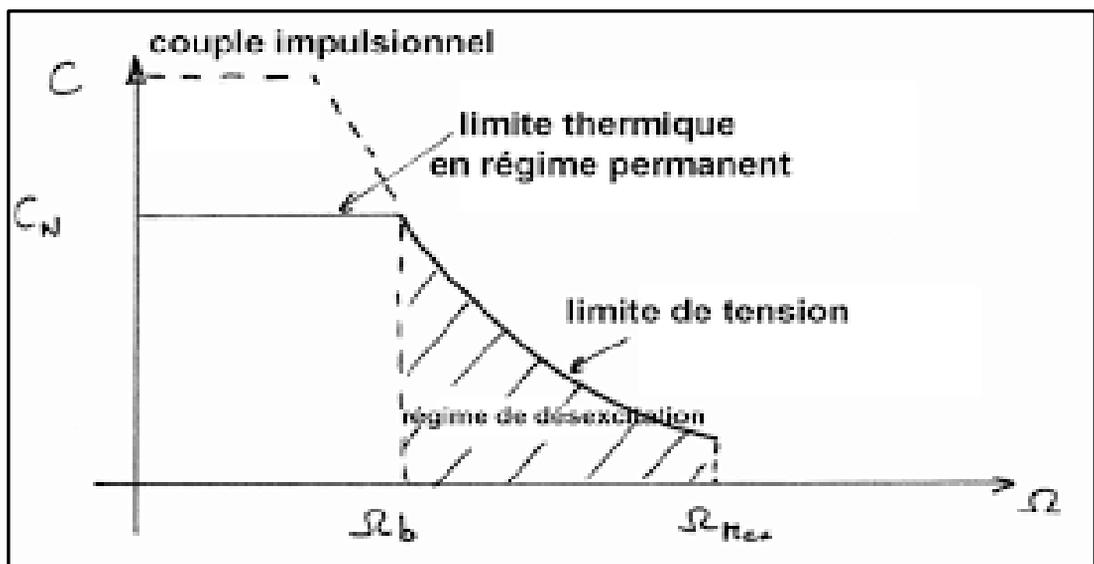


Figure I .22 : représente les caractéristique couple/vitesse d'une machine synchrone

I.13.3. Systèmes utilisant des machines spéciales :

Ce type de machines est communément appelé machines à reluctance variable. Elles peuvent être excitées par les courants triphasés au stator ou ne pas l'être. Ce type de machine reste à l'état de prototype et ne satisfait pas les critères de l'industrialisation. [4]

I.14. Le vent :

L'énergie du vent est une ressource avec encore de grande capacité de développement. Le principal problème avec l'exploitation de cette énergie c'est les normes de protection du paysage établie dans les pays, qui empêche l'installation de l'éolienne mais aussi les procédures pour obtenir l'autorisation de construire qui peuvent prendre de nombreuses années. Concernant l'Algérie, actuellement cette énergie est encore très peu exploitée.

I.14.1. Source du vent :

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles.

Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre [4]

I.14.2 Les type de vents :

I .14.2.1. Les vents géostrophiques ou globaux :

Les vents géostrophiques sont aussi appelés les vents globaux. Ces vents sont provoqués par l'écart de température et de pression (comme expliqué précédemment). On les trouve à une hauteur de plus de 1000 mètres au dessus du niveau du sol. La surface de la terre n'a donc que peu d'influence sur ceux ici.

I .14.2.2.Les vents de surface :

C'est ce type de vent qui représente le plus grand intérêt pour l'énergie éolienne. En effet, ils soufflent jusqu'à 100 mètres au dessus du sol. Le sol a donc une grande influence sur ceux-ci. Les obstacles naturels ou artificiels ainsi que la rugosité (par exemple la mer va moins le vent que des buissons ou de l'herbe) peuvent le ralentir ou le dévier

I .14.2.3.Vents locaux: les brises de mer :

Les vents locaux ont eux aussi une grande importance pour déterminer les vents dominants sur un site donné. Par exemple les brises de mer qui viennent de la différence de températures entre la mer et la terre ou les vents de montagnes qui vont monter et descendre le long des versants qui entourent la vallée. Il faut donc tenir compte des particularités topographiques du lieu ainsi que des vents que ces particularités pourraient créer. [4]

I.14.3 Variation de la vitesse du vent :

Plusieurs facteurs sont la cause des variations du vent, à savoir : le temps, la topographie ainsi que les obstacles. La production énergétique d'une éolienne va donc aussi varier.

Il existe aussi des variations dites journalières. Par exemple le vent soufflera plus fort et sera plus changeant la journée que la nuit. On peut aussi constater des variations en

Généralités sur les éoliennes

fonction des saisons. Dans les zones tempérées (température moyenne en hiver et en été) on constate que le vent souffle moins pendant l'été. Ce qui présente un avantage, car habituellement, la consommation d'énergie est plus forte l'hiver que l'été, et l'éolienne produira donc aussi plus d'énergie l'hiver. [4]

I.15. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les éoliennes et leur fonctionnement, leur constitution ainsi que leur classification.

On peut donc dire que l'éolienne a un système de fonctionnement assez simple, c'est une énergie pouvant être utilisée dans n'importe quel lieu. Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie électrique qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne rejette aucun gaz ni aucun liquide dans la nature.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous concentrer sur la maintenance des éoliennes et l'identification des composantes critiques.

Chapitre II :
**MAINTENANCE DES EOLIENNES ET IDENTIFICATION DES
COMPOSANTES CRITIQUES**

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

II.1 Généralité sur la maintenance :

II.1.1. Introduction :

La maintenance métier historique mais officialisé par l'industrialisation depuis une quarantaine d'année, applicable à divers domaines, dont la production d'énergie éolienne basée sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité. En général, les éoliennes ont une durée de vie de 20 à 25 ans. Pendant cette période, les opérateurs exploitant le parc ont mis en place une série d'opérations visant à assurer la disponibilité des éoliennes et leur bon fonctionnement, ainsi qu'à réduire les temps d'arrêt et les pannes, il est donc nécessaire d'assurer pour les parcs éoliens une bonne gestion de la maintenance qui s'effectue sur la partie mécanique, électrique ou bien sur les composants de contrôle afin améliore la qualité de la production, ces missions résident autour d'action de dépannage, réparation, vérification, contrôle, déclassement, réforme, et la détection des composants critiques qui provoquent des pannes fréquentes.

II.1.2. Définition du la maintenance :

D'après la norme AFNOR X 60-010, la maintenance est définie comme étant « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». En effet, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, réparation, amélioration, vérification, ...) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production ainsi que la sécurité d'opération. Aussi un ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien. [9]

- Maintenir : contient la notion de «prévention» sur un système en fonctionnement.
- Rétablir : contient la notion de «correction» consécutive à une perte de fonction
- Le management : concerne les activités de direction qui déterminent les objectifs la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance et qui les mettent en application par des moyens tels que la planification, le contrôle, la maintenance.

La fonction maintenance peut être présentée comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion. Ces différentes activités sont représentées dans la (figure II.1): contenu de la fonction maintenance. [10]

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

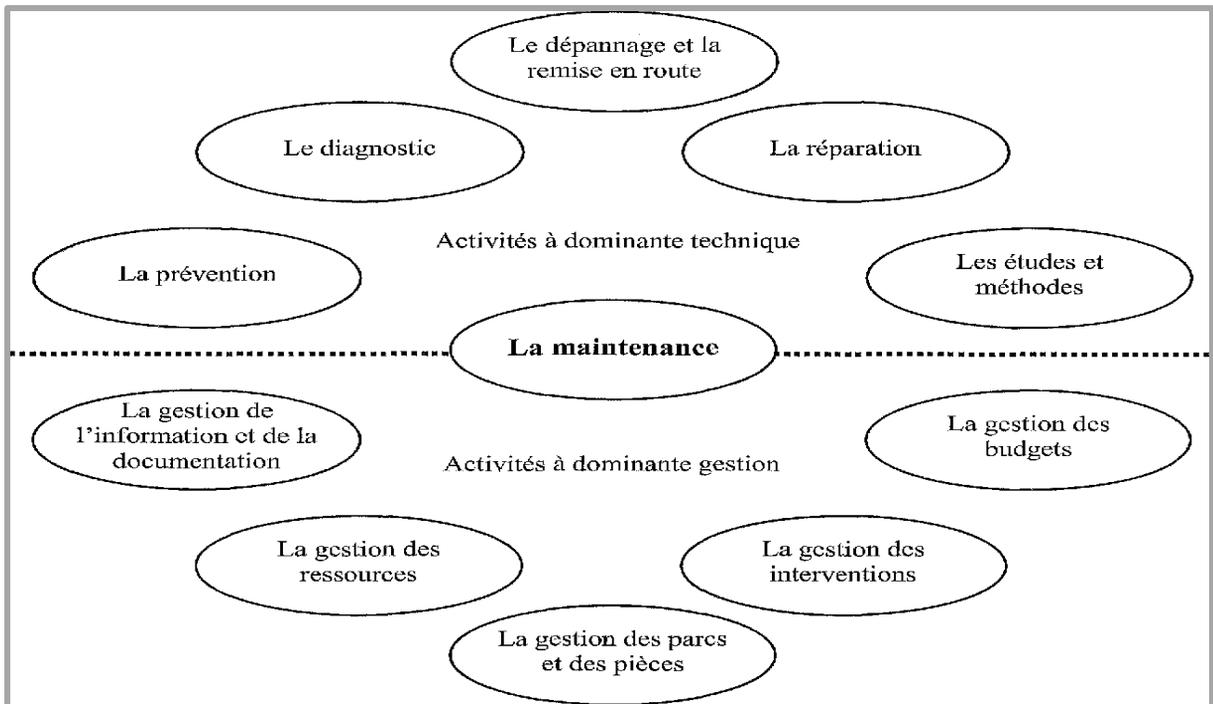


Figure II.1 : contenu de la fonction de maintenance [10]

II.1.3. Les 5 niveaux de maintenance :

- **1er niveau :** Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien.
- **2ème niveau :** Actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en œuvre simple. Ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance.
- **3ème niveau :** Opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre.
- **4ème niveau :** Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou généralités technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés. Ce type d'opération de maintenance est effectué par un technicien ou une équipe spécialisée à l'aide de toutes instructions de maintenance générales ou particulières.
- **5ème niveau :** Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

de soutien industriels. Ce type d'opérations de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué par le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proches de la fabrication du bien concerné. [11]

II.1.4. choix des méthodes de maintenance :

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise.

Pour choisir il faut donc :

- être informé des objectifs de la direction.
- des directions politiques de maintenance.
- connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels.
- le comportement du matériel en exploitation.
- les conditions d'application de chaque méthode.
- les coûts de maintenance.
- les coûts de perte de production.

II.1.5. Les 3 échelons de maintenance:

Selon la norme NF : FD X 60-000 Les échelons de maintenance spécifient l'endroit où les interventions sont effectuées. On définit généralement trois échelons qui sont :

II.1.5.1 La maintenance sur site : L'intervention est directement réalisée sur le matériel en place.

II.1.5.2 La maintenance en atelier : Le matériel à réparer est transporté dans un endroit, sur site, approprié à l'intervention.

II.1.5.3 La maintenance chez le constructeur ou une société spécialisée : Le matériel est alors transporté pour que soient effectuées les opérations nécessitant des moyens spécifiques. [11]

II.1.6 Type de maintenance :

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Il existe deux types principaux qu'on peut appliquer sur un équipement, lorsque la panne est déjà présente on doit la réparer on applique une maintenance corrective et d'un autre coté on doit anticiper

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

et prévenir les défaillances avec la maintenance préventive. On peut résumer tout ça dans la (figure II.2) suivante:

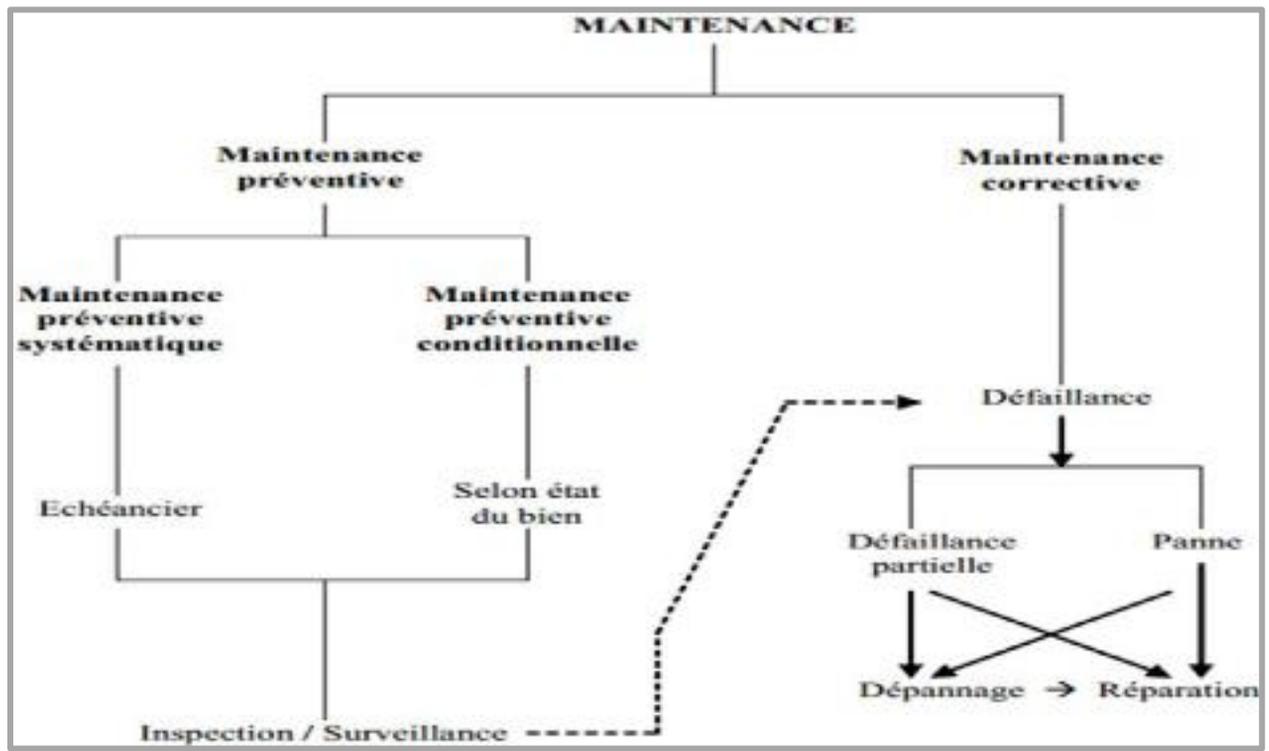


Figure II.2: Type de maintenance

II.1. 6.1. Maintenance corrective:

Ensemble des activités palliative ou curative réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement. [12]

II.1.6.2. Maintenance préventive :

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique), et/ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle ou prévisionnelle).le but de la maintenance préventive est de :

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

- Augmenter la durée de vie des matériels.
- Diminuer la probabilité de défaillances en service.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions;
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc....
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves. [31]

a. Maintenance préventive systématique:

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, etc.

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle. [12]

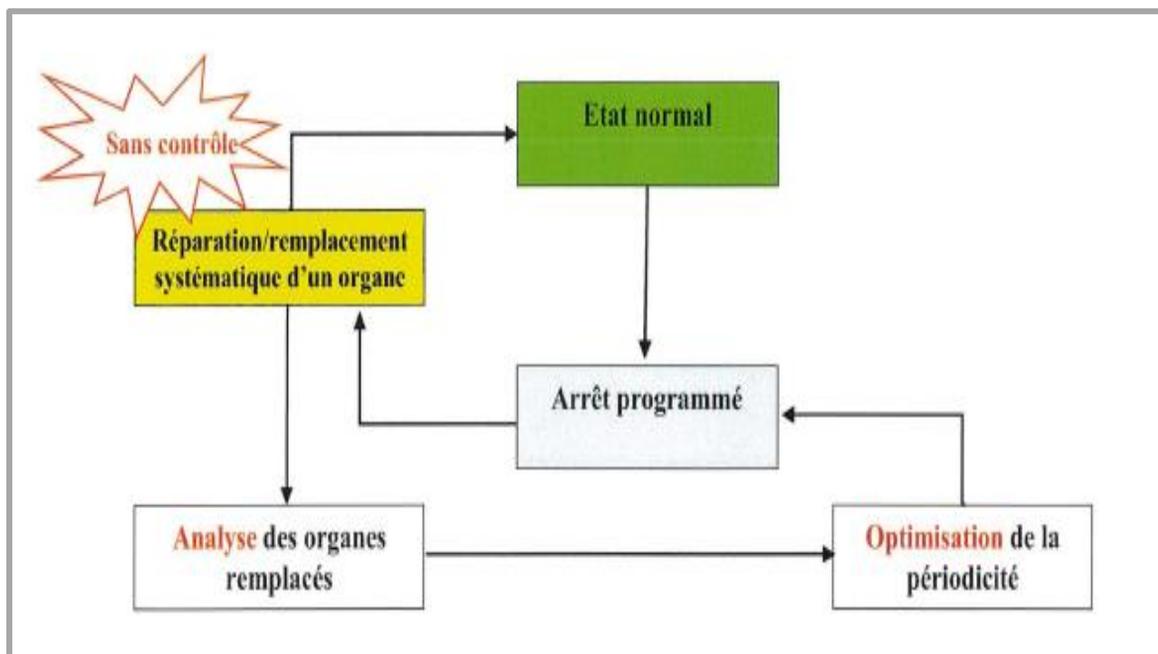


Figure II.3 : Cycle de maintenance préventive systématique [13]

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

b. Maintenance préventive conditionnelle:

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien, et des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue.

La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel.

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs.

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement. Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- Le niveau et la qualité de l'huile
- Les températures et les pressions
- La tension et l'intensité des matériels électriques
- Les vibrations et les jeux mécaniques. [12]

Détection ➡ diagnostic ➡ intervention

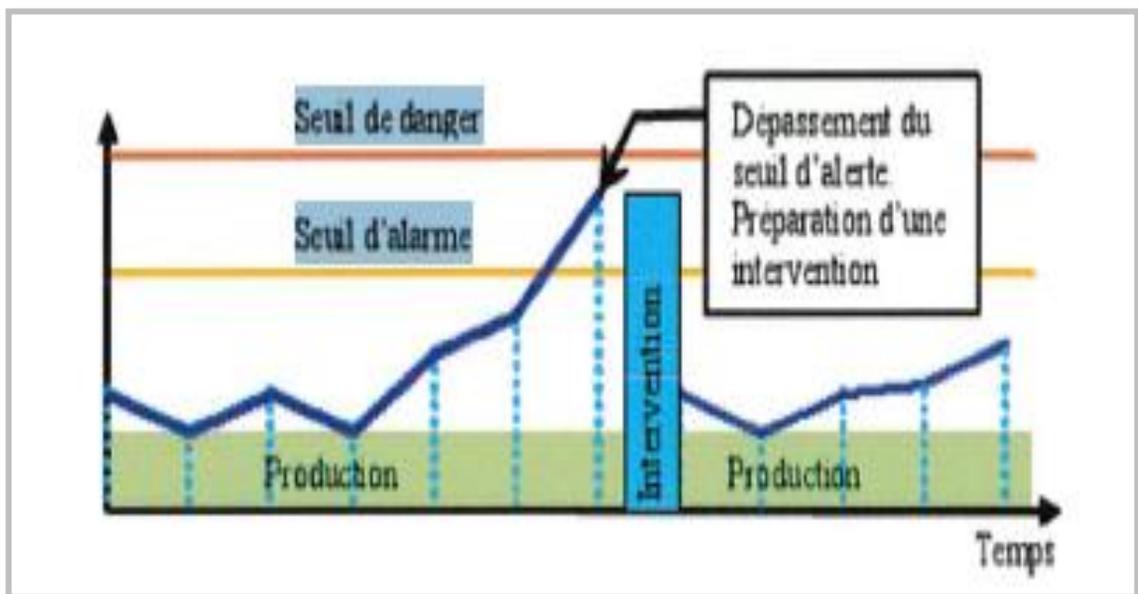


Figure II.4 : schématisation de maintenance conditionnelle. [13]

Maintenance des éoliennes et identification des composants critiques

c. Maintenance préventive prévisionnelle:

C'est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et planifier les interventions quelques concepts fondamentaux liés à la maintenance. [12]

Prévision \Rightarrow diagnostic \Rightarrow intervention

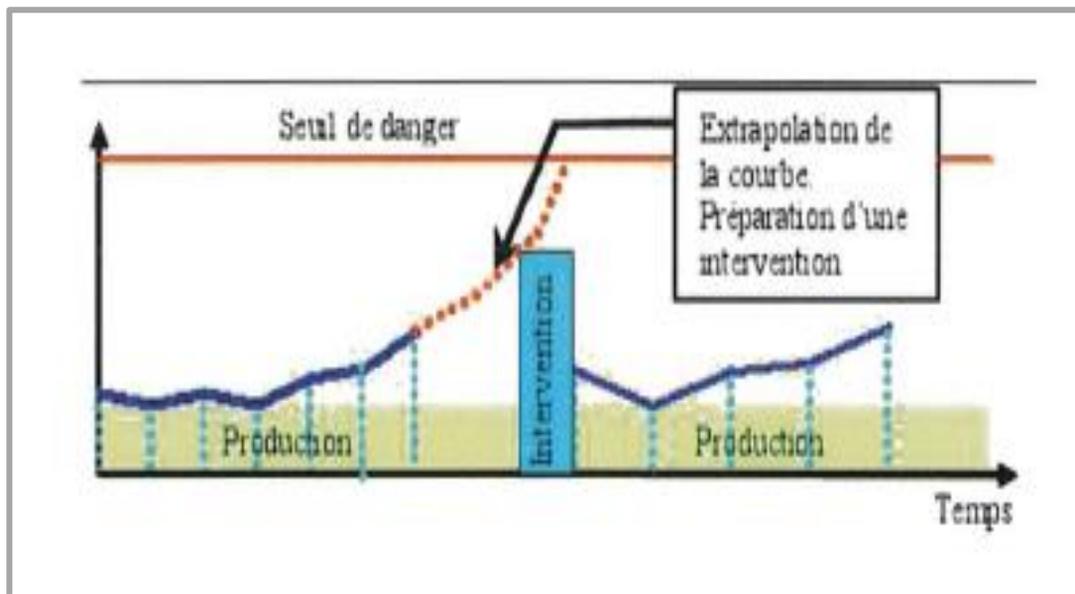


Figure II.5 : schématisation de maintenance préventive prévisionnelle [13]

II .1.7. Objectifs de la maintenance :

Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la **figure II.6**, sont nombreux :

- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais.
- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes)
- Augmenter la fiabilité d'un équipement, donc réduire les défaillances en service
réduction des coûts de défaillance, amélioration de la disponibilité
- Augmenter la durée de vie efficace d'un équipement
- Améliorer l'ordonnancement des travaux, donc les relations avec la production
- Réduire et régulariser la charge de travail
- Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues)
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses)
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple: améliorer la productivité). [13]

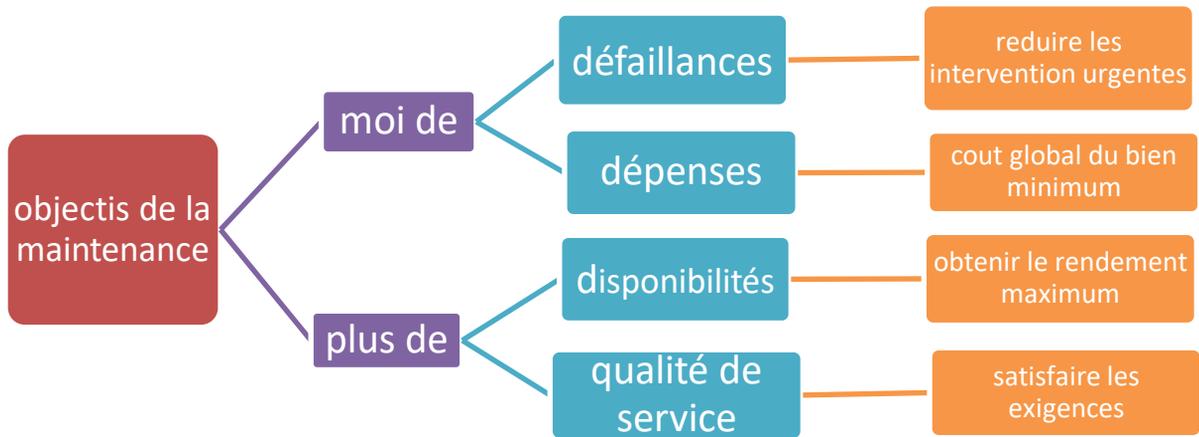


Figure II.6 :schématisation des objectifs de la maintenance [13]

II .2. Maintenance des éoliennes :

II .2.1.Introduction :

Dans nos jours le développement des éoliennes tendent vers des structures complexes plus lourdes généralement utilisées dans un environnement rude et présentent donc des taux de défaillance relativement plus élevés qui consiste une maintenance continuellement.

La réparation ou le remplacement d'un composant défaillant nécessite des coûts supplémentaires et entraîne une perte de production d'énergie. Dans ce chapitre on s'intéresse essentiellement à la cause de défaillances des composants les plus critiques qui provoque un long temps d'arrêt d'éolienne et la meilleure stratégie de maintenance.

II .2.2. Type et cause défaillances des composants critiques des éoliennes :

Les éoliennes sont des intégrations assemblées de plusieurs composants peut être regroupé on deux catégorie mécanique et électrique, les défaillances les plus fréquentes sont les suivantes :

II .2.2.1.Défaillances des boîtes de vitesses :

La boîte de vitesses est une partie essentielle dans la majorité des turbines éoliennes.il est l'un des composants les plus fréquemment endommagés, ces défauts typiques observés sont représenté dans les dommages aux roulements, aux engrenages, les fuites d'huile, la rupture d'un arbre, on peut résumer certains facteurs causent ces défaillance comme suit :

- dépassement de la charge de conception
- vibration
- matériau inadéquat
- perte de d'huile de lubrification
- un refroidissement insuffisant d'huile
- la fatigue et l'usure de la surface

Il convient de noter que les défaillances des roulements sont détectées comme étant la majorité des défaillances de la boîte de vitesses en raison de l'écaillage de la structure blanche, de l'éraflure et du micropitting.



Figure II .7 : Défaillance d'une dent planétaire de la boîte de vitesse [42]

II .2.2.2. Défaillances des générateurs :

Le générateur est un composant important pour le fonctionnement d'une éolienne il est soumis à plusieurs facteurs comme les effets environnementaux, surcharges, la fatigue....etc. ce qui produit des défaillances courantes suivantes :

- La cannelure (un défaut de roulement typique de la chaîne cinématique électrique) : Elle est causée par le passage prolongé d'un courant électrique relativement faible, généralement dû à une fuite de courant.
- Rupture de l'isolation de l'enroulement du stator : elle est causée par des contraintes mécaniques, électriques et thermiques.
- Asymétrie électrique du rotor: Elle est causée par l'augmentation de la résistance ou le circuit ouvert des circuits balais-engins.
- Surchauffe
- Survitesse
- vibration
- Désalignement
- Défaillance mécanique
- Perte de contrôle de la chaîne cinématique

Ces défaillances peuvent entraîner une pulsation prolongée du couple, des déséquilibres du flux d'entrefer et des courants de phase, une réduction du couple moyen, un échauffement excessif de l'enroulement, une augmentation des pertes et une diminution de l'efficacité.

II .2.2.3.Défaillances des pales :

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

Elle 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 il fonctionnent régulièrement dans des conditions environnementales sévères, on peut citer quelque d'eux comme les turbulents du vent et les foudres ,la salinité de l'air, rafales de vent, inclusions d'eau, pollution atmosphérique, oxydation atmosphérique, givrage.... Aussi d'autre facteur comme des charges de fatigue plus élevées que prévu, charges extrêmes, déséquilibre.

Ces conditions peuvent provoquer plusieurs types de dommages, notamment :

- La rupture du joint adhésif entre les peaux le long des bords d'attaque et/ou de fuite
- Le décollement de l'adhésif
- La rupture des fibres et du stratifié
- Le délaminage
- La déformation de la pale et la croissance de fissures dans le gel-coat.
- Il peut y avoir des collisions catastrophiques entre la pale et la tour qui conduisent à l'effondrement de l'ensemble de l'éolienne.
- Fracture , Fissuration
- Détérioration
- Des courbures
- Coinçage ou blocage
- panne de moteur



Figure II .8 : érosion d'une pale [42]



Figure II.9 : la fissure d'une pale [42]

II .2.2.4. 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.

On peut résumer les modes défaillance des autres composants comme suite :

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

Le composant	Sa fonction	type défaillance	Cause
Arbre principal	Transmettre un grand couple	Fracture	Charges de fatigue sous-estimées ; fonctionnement du groupe électrogène dans conditions non prévues ; propriétés des matériaux inférieures spécifications
moyeu	Transmettre le couple des pales	-Défaillance de la structure ; -Défaillance des boulons	-Dépassement des charges de conception. -pré charge excessive. -contrainte Corrosion
Filtre	Pour extraire et retenir toutes particules contaminants des fluides hydrauliques	Fuite du boîtier	-Dommages au boîtier ou aux joints d'étanchéité
Système de lacet	Permet à la nacelle de tourner sur la tour	Augmentation du frottement de friction.	-Rouleau fissuré -Surface écaillée -manque de Lubrification
Joint d'huile	- Retenir l'huile dans le principal -Exclure les corps étrangers	Coupure ou usure de la lèvre	-Dommage de l'installation -Usure
Lubrification	-Lubrifier la boîte de vitesses et le roulement du rotor	-Perte d'huile -surchauffe -huile sous température	-Panne de la pompe -Fuite -Défaillance de la vanne de dérivation -Température ambiante supérieure ou inférieure aux conditions de conception -Pertes par frottement -Défaillance de la valve

Tableau II .1: type et mode défaillance de quelque composant d'éolienne

II .2.3. Revue des analyses de criticité des composantes principales d'éoliennes :

Beaucoup d'études faites aux États-Unis et certains pays de l'Europe ont permis de collecter des informations issues de l'opération de différents parcs éoliens comportant plusieurs technologies d'éoliennes. Ces études ont permis d'établir un classement de vulnérabilité des composantes critiques des éoliennes qu'on peut voir dans ce qui suit :

II .2.3.1. Étude Suédoise :

Cette étude de fiabilité a été réalisée sur un parc de 723 éoliennes en Suède et ceci durant une période de huit ans entre 1997 et 2005. En fait, cette étude est l'une des activités de recherche effectuée par l'Institut royal de technologie de Stockholm sur la maintenance des parcs éoliens. Comme le montre la (Figure II.10), le composant qui a le pourcentage d'arrêt le plus élevé est la boîte de transmission, ensuite on trouve le système de contrôle suivi du système électrique et à la fin on trouve les freins de l'éolienne.

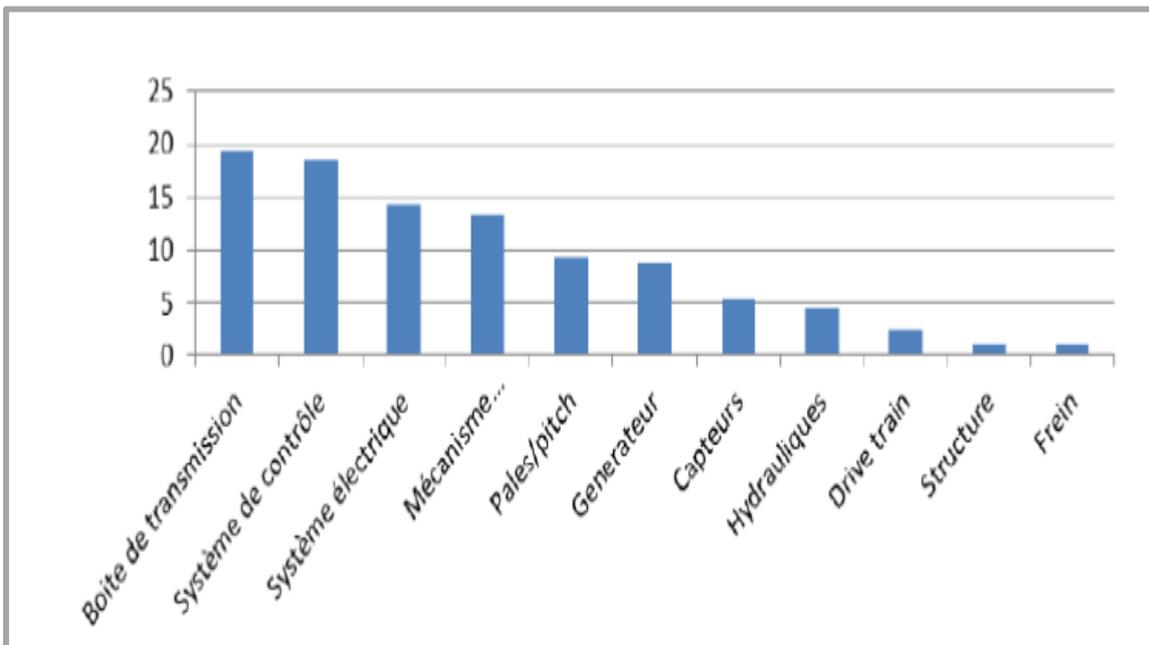


Figure II.10 : Pourcentage d'arrêt par composant de l'éolienne installée au suède [14]

II .2.3.2. Étude Portugaise :

Une étude basée sur les données d'un an d'exploitation d'un parc éolien au Portugal, composé de 13 éoliennes de 2 MW chacune a permis de révéler que les équipements les plus pénalisant en terme de temps d'arrêt sont le générateur, la boîte de transmission, et le rotor des pales.

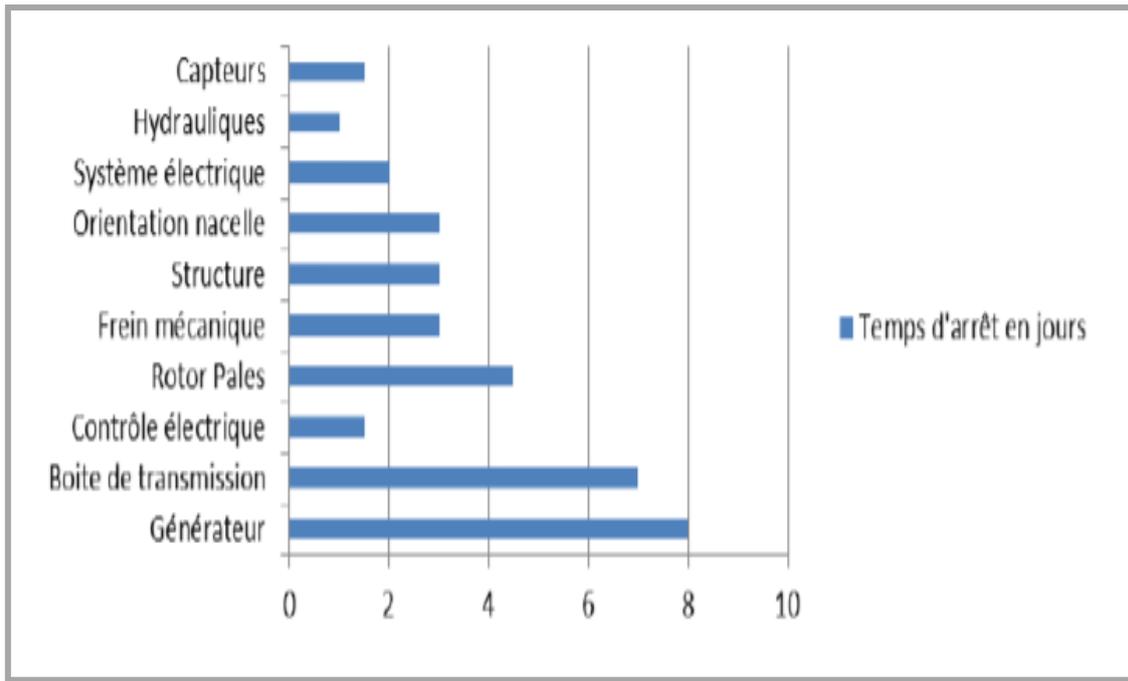


Figure II.11: Temps d'arrêt des composants des éoliennes d'un parc éolien au Portugal [14]

II.2.3.3 Étude Finlandaise :

Une étude de fiabilité a été réalisée sur 72 éoliennes en Finlande durant la période de 1996-2008. La (Figure II.12) montre les résultats obtenues après cette étude et représente le pourcentage des défaillances et les temps d'arrêt pour chaque composant de l'éolienne.

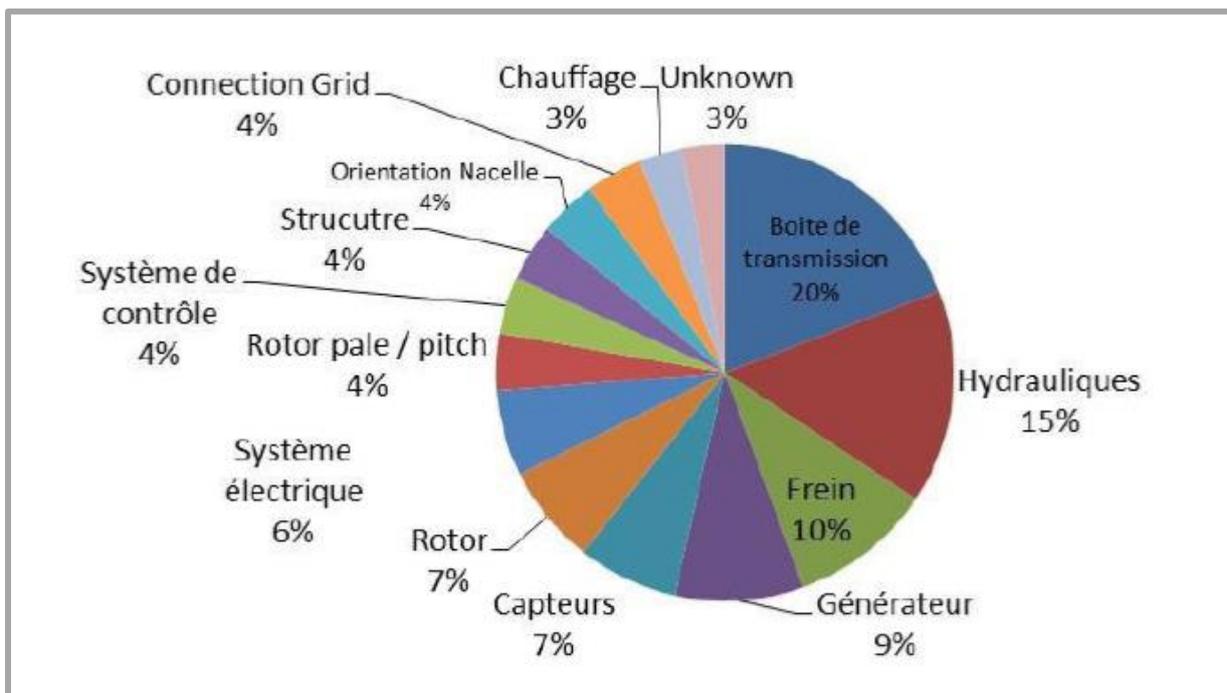


Figure II.12: Temps d'arrêt des composants des éoliennes en Finlande [14]

II.2.3.4. Étude Allemande :

Cette étude est réalisée en effectuant la surveillance de 1,467 éoliennes en Allemagne majoritairement d'une puissance moyenne inférieure de 1MW et ceci durant la période de 1989 à 2004. Les analyses statistiques des données ont déterminé les éléments les plus pénalisants en fonction du temps d'arrêt.

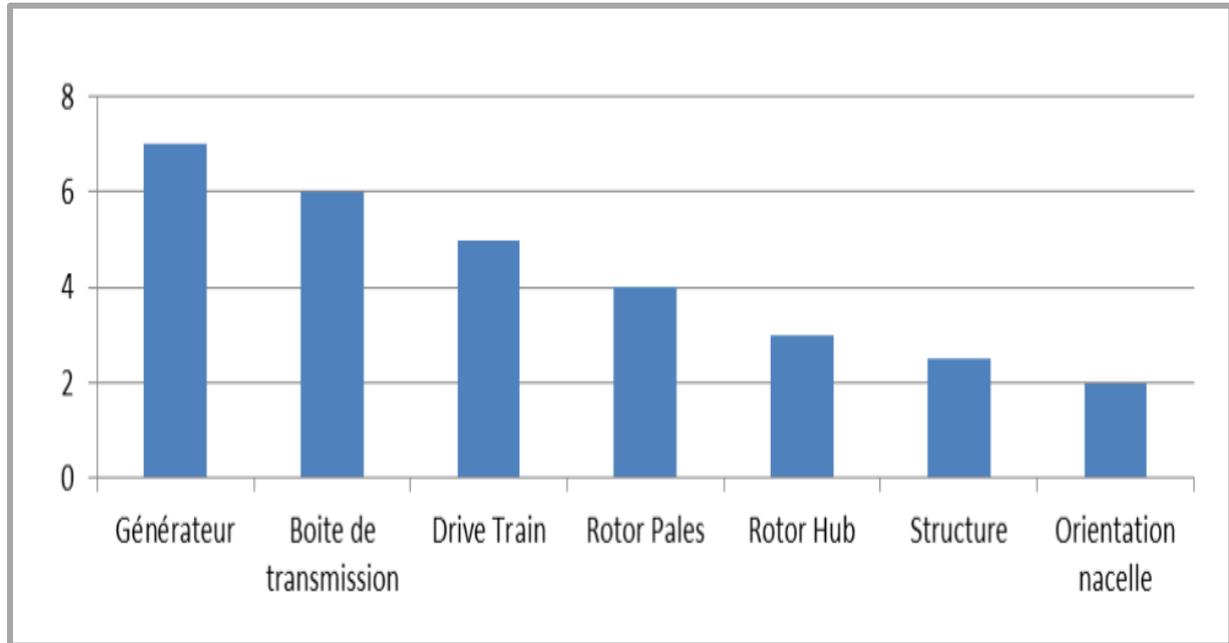


Figure II.13: Temps d'arrêt des composants d'éoliennes en Allemagne [14]

Le Tableau II.2 présente Liste comparative des éléments critiques par pays

Pays	Allemagne	Suède	Finlande	Portugal
Classement par pourcentage du temps d'arrêt	-générateur. -Boîte de transmission. -Drive train.	-Boîte de transmission -système de contrôle -système électrique	- Boîte de transmission -pale/pitch -hydraulique	-générateur - Boîte de transmission -rotor/pale
Classement par temps d'arrêt	-générateur - Boîte de transmission -Drive train	-Boîte de transmission -Système de contrôle -système électrique	-Boîte de transmission -pale/pitch -hydraulique	-générateur -Boîte de transmission -rotor/pale

Tableau II.2 : Liste comparative des éléments critiques par pays [14]

- L'analyse des résultats obtenus à partir de ces études montrent que malgré la différence géographique, les conditions d'opération, la capacité de production éolienne, la technologie de fabrication et l'âge des éoliennes, qui sont différentes d'un pays à l'autre, l'ensemble des composantes critiques et le type de défaillances semblent être les mêmes à une différence près. Le générateur et la boîte de transmission sont les plus critiques d'après la majorité des études.

L'analyse de ces résultats indique que le composant le plus critique c'est la boîte de transmission (vitesse) et le générateur, pour cela une surveillance est nécessaire pour identifier le sous système critique de ces composant afin de faire une stratégie de maintenance et réduire le taux de défaillance. [14]

II.2.4. Identification des sous-systèmes critiques issue de l'utilisation de la méthode pieu :

II.2.4.1. Présentation de la démarche suivie :

Les besoins en termes de maintenance varient d'un équipement à un autre selon la nature et l'utilisation de chaque composant. Pour se faire, il est important de classer et d'analyser la criticité de chacun des équipements utilisés ou des sous-systèmes constituant le système global à étudier. La criticité est en fait l'indice qui permet de prévoir les conséquences d'un bris ou de la panne d'une installation sur le fonctionnement général de l'entreprise. Elle se mesure à partir de quatre critères qui seront mentionnés ci-dessous.

- **Premier indice : indice des pannes P**

On peut en déduire donc les conséquences techniques et économiques sur l'environnement et la sécurité des personnes et de leurs biens. En d'autres termes obtenir une prévision en cas d'apparition une panne.

- **Deuxième indice : importance de l'équipement I**

Cet indice caractérise l'influence que peut avoir une certaine panne sur la production d'une entreprise ou d'un système donné.

- **Troisième indice : État de l'équipement E**

En effet, le critère E est lié à l'âge du matériel, sa précision, son usure, son implantation (ambiance poussiéreuse, abrité ou non, ...). Il peut se déterminer globalement d'après l'aspect général, l'état des organes de travail, le niveau de "vétusté" et d'obsolescence des équipements de contrôle et commande électrique.

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

L'état de l'équipement est un critère qui peut être déterminé en se basant sur son âge et sa durée d'opération depuis son implantation

- **Quatrième facteur : taux d'utilisation U**

Indique la proportion du temps d'engagement de l'équipement sur le temps total disponible (temps d'ouverture)

Un poids, comportant cinq niveaux différents commençant de 0,1 et allant jusqu'à 4 est associé à chacun des critères mentionnés ci-dessus. Ceci aide à l'évaluation et à la notation de chaque composant. Le tableau II.3 suivant repris permet d'apprécier les niveaux et d'attribuer ainsi les notes à chaque niveau et ceci en calculant l'indice de criticité global selon la relation suivante :

$$Cr = P * I * E * U \dots\dots\dots \text{II.1}$$

INDICE /POIDS	0.1	1	2	3
P	Arrêt total de plusieurs jours la production éolienne	Arrêt de plusieurs heures de la production éolienne	Possibilité de produire l'électricité en mode dégradé	Pas de répercussions sur la production
I	Stratégique : pas de composant redondant mais possibilité de fonctionnement en mode dégradé	Primaire : pas de redondance mais possibilité d'un fonctionnement en mode dégradé	Secondaire : redondance avec capacité limitée	De secours : redondance totale
E	A remettre au rebut	A remettre en état à cout élevé	A remettre en état à faible cout	Quasi neuf
U	Saturé (utilisation > 98.5%)	Fort (90 < utilisation < 98.5%)	Moyen (70% < utilisation < 90%)	Faible (utilisation < 70%)

Tableau II.3: Grille d'évaluation de la criticité repris

Les équipements sont ensuite regroupés en trois catégories selon la valeur de l'indice global de criticité de chaque équipement :

- Catégorie A : (0 < CR < 1) les équipements sont jugés super critiques

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

- Catégorie B : ($1 \leq CR \leq 10$) les équipements sont jugés critiques
- Catégorie C : ($10 \leq CR \leq 256$) les équipements sont jugés Banals

Donc les catégories A et B sont prioritaires et nécessitent beaucoup plus d'attention et d'effort que les autres catégories.

La méthode PIEU originale est généralement appliquée sur des équipements de production. Elle sera utilisée dans le cadre de ce travail pour hiérarchiser les sous-systèmes d'un certain équipement.

Équipement	Désignation	Indice	Indice	Indice	Indice	Criticité CR
		P	I	E	U	
1	générateur	0.1	0.1	1	0.1	0.001
2	Boîte de transmission	0.1	1	1	0.1	0.01
3	rotor	2	1	1	1	2
4	Drive train	0.1	1	1	2	0.2
5	Système électrique	1	0.1	1	2	0.2
6	Pales/pitch	0.1	1	2	1	0.2
7	Système de control	2	1	0.1	1	0.2
8	Mécanisme d'orientation de la Nacelle	1	1	2	3	6

Tableau II.4 : résultats de la démarche suivie

Après avoir exposé la méthode PIEU, qui permet de classier les différents composants de l'éolienne mentionnées dans le tableau ci-dessus selon leur criticité : **CR**

Il est maintenant clair que les deux composants les plus critiques dans la majorité des éoliennes sont le générateur et la boîte de transmission (les roulements). [14]

II.2.5. Choix de type de maintenance des éoliennes :

Afin de bien choisir le type de maintenance des éoliennes, nous nous intéressons à comparer les avantages et les inconvénients de ces différentes méthodes. Le tableau **II.5** présente quelques avantages et inconvénients pour les différentes méthodes de maintenance appliquées à l'énergie éolienne.

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

Type de maintenance	Avantage	Désavantage
corrective	<ul style="list-style-type: none"> -Bas coût de maintenance lorsque l'équipement est en opération - Les pièces sont utilisés presque jusqu'à la fin de leur vie 	<ul style="list-style-type: none"> -Risque élevé de dommages consécutifs entraînant des temps d'arrêt importants. - Aucune planification de maintenance n'est possible. - La logistique des pièces de rechange est compliquée. -Des délais de livraison longs pour les pièces
Préventive	<ul style="list-style-type: none"> -La maintenance peut être planifiée -Faible temps d'arrêt -Logistique des pièces de rechange facile 	<ul style="list-style-type: none"> -Les composants ne seront pas utilisés pour une durée de vie maximale. -Les coûts d'entretien sont plus élevés par rapport à la maintenance corrective.
conditionnelle	<ul style="list-style-type: none"> -Les composantes seront utilisées jusqu'à la fin de leurs vie -Les taches de maintenance peuvent être bien planifiées -Le temps d'arrêt prévu est faible -La logistique des pièces de rechange est facile, car un défaut peut être détecté tôt dans le temps 	<ul style="list-style-type: none"> -La durée de vie restante des composants est presque connue à une erreur près. -Un effort important pour le matériel de surveillance des conditions est requis. - Il est difficile d'identifier les seuils de condition appropriés. -Pas un marché mature pour les systèmes de surveillance de l'énergie éolienne.

Tableau II.5 : comparaison de différent type (méthode) de maintenance

D'après ce tableau le type de maintenance le plus adéquat pour prévoir les bris et les défaillance à un stade précoce est la maintenance conditionnelle ce qui permet aux opérateurs des parcs éoliens de bien planifier leur taches de maintenance lors des interventions aussi bien gérer la logistique de pièces de rechange et par conséquent réduire les temps d'arrêts des

éoliennes ce qui reflète une réduction des prix de maintenance et du cout de production de l'énergie éolienne. [14]

II.2.6. Technique de maintenance conditionnelle :

La maintenance conditionnelle se base sur l'analyse des grandeurs mesurées afin de détecter ou signaler une anomalie au niveau d'un système avec différente méthode on distingue :

II.2.6.1. Analyse des vibrations :

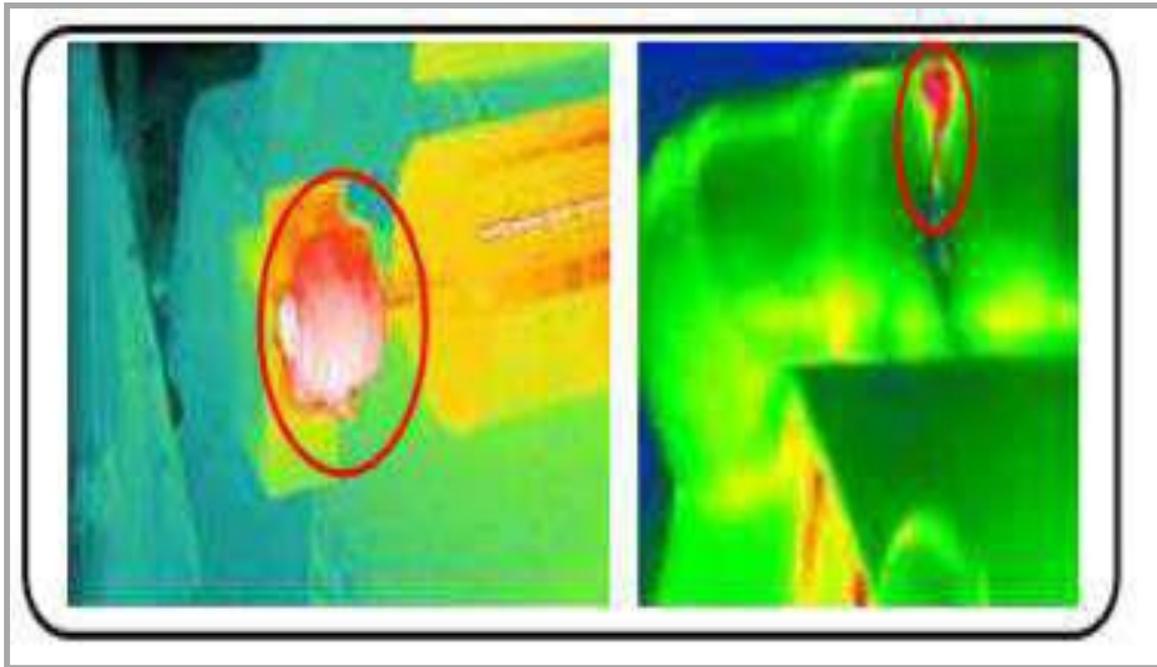
Ce type d'analyse est le plus utilisé en industrie car il est adapté aux systèmes mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement particulièrement les machines tournantes, vibrent et l'image vibratoire de leurs vibrations à un profil très particulier lorsqu'elles sont en état de bon fonctionnement. Dès que des phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement, de désalignement, de balourd, etc. Apparaissent, l'allure de cette image change, ce qui permet, de quantifier l'intervention. La plupart des défauts mécaniques peuvent être détectés par cette technique. L'investissement à prévoir pour ce type de mesure va de 3 000 DT (off-line) à 100 000 DT (online). [14] [15]

II.2.6.2. Thermographie infrarouge :

.La thermographie est une technique, la moins utilisée dans la surveillance des équipements ou machines tournantes. Elle mesure l'intensité des émissions de rayons infrarouges (c'est-à dire de chaleur) par une caméra infrarouge, afin de déterminer les conditions opératoires de l'équipement. Grâce à la détection des anomalies thermiques certaines zones sont plus chaudes ou plus froides qu'elles ne devraient l'être, un inspecteur expérimenté peut localiser et identifier les incidents dès leur naissance. Le champ d'application de cette technique est très vaste et on peut citer :

- La détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs surdimensionnés, cosses mal vissées, etc..) ou mécaniques (dégradation d'un palier)
La détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations etc....

La thermographie infrarouge est relativement coûteuse (8 000 DT à 70 000 DT environ pour l'ensemble caméra + logiciel de traitement d'images associé), mais c'est un outil très polyvalent. [15]



a) Défaut sur un pali. **b)** Fuite sur une canalisation

Figure II.14:Images thermographiques. [15]

II.2.6.3. L'analyse des mesures ultrasonores :

Tout mouvement relatif entre pièces produit des ultrasons de friction. La mesure et l'enregistrement des signaux ultrasonores effectués à cadence régulière, et leur suivi dans le temps permettent de détecter beaucoup de problèmes de façon simple efficace et peu onéreuse.

La technique offre de multiples applications dans le contrôle d'équipements hydrauliques et pneumatiques (détection de fuites, contrôle d'étanchéité) et permet aussi de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.).[15]

II.2.6.4. L'analyse d'huiles :

L'analyse d'huiles est d'une importance primordiale dans tout programme de maintenance des machines industrielles. La mise en œuvre de cette analyse est simple et presque tous les mécanismes lubrifiés sont susceptibles d'être sujets à ce diagnostic. L'huile est en contact permanent avec les pièces en mouvement. Elle fournit de nombreuses informations sur l'état de la machine. Lorsque l'équipement est mis à rude épreuve, la qualité du lubrifiant s'en ressent. L'analyse d'huile permet de suivre dans le temps les caractéristiques physico-

chimiques du lubrifiant. Cela permet d'apprécier son état de dégradation et donc son aptitude à remplir sa fonction dans la machine.

Les résultats de l'analyse permettent de déceler des anomalies telles que :

- La contamination par des particules internes de l'équipement
- La pollution par des agents extérieurs
- L'usure par abrasion

L'analyse d'huile fait partie des moyens mis en œuvre pour faire la maintenance préventive. Avec l'analyse vibratoire et la thermographie, elle permet d'éviter les pannes imprévues et les réparations coûteuses. [15]

II.2.6.5. L'analyse acoustique :

L'analyse acoustique autorise une surveillance continue des équipements et permet de l'apparition de défauts audibles et ceci à travers des microphones placés à distance de l'équipement à surveiller. [14]

II.2.6.6. Le contrôle par ultrasons :

Le contrôle par ultrason permet la détection des défauts de petites amplitudes à des fréquences élevées tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement.

Afin de quantifier la gravité des pannes et des défauts des roulements, la technique de surveillance utilisée ne doit pas se limiter seulement à la détection des défauts, mais aussi à la réalisation d'un pronostic et d'un diagnostic approfondi qui permet la localisation des pannes et des bris et calculer la durée de vie restante du roulement. L'analyse vibratoire est une technique permettant la réalisation de ce pronostic et ce diagnostic. Pour ce faire, dans ce travail on va utiliser une analyse vibratoire pour élaborer un modèle de pronostic qui permet la prédiction de la durée de vie résiduelle d'un roulement d'une boîte de vitesse d'une éolienne. Ce type de modèle nécessite d'étudier les contenus fréquentiels des signaux à l'aide des outils de traitements de signaux qu'on va voir dans le tableau suivant dans le choix des indicateurs vibratoires. [14]

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

	Principaux avantage	Principale limitation	Champ d'application privilège
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> -Détection de défauts à un stade précoce, -Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi, -Autorise une surveillance continue, -Permet de surveiller de l'équipement à distance 	<ul style="list-style-type: none"> -Spectres parfois difficiles, -Dans le cas de surveillance continue, -installations relativement coûteuses. 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> -Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement, -Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas de localiser précisément le défaut, - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon. 	<ul style="list-style-type: none"> -Contrôle des propriétés Physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le processus (étanchéité) ...
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> -Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation, -Interprétation souvent immédiate des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire, -Contrôle limité à ce que 'voit' la caméra -Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi 	<ul style="list-style-type: none"> Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier).
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> -Permet de détecter de l'apparition de défauts audibles, -Autorise une surveillance continue. 	<ul style="list-style-type: none"> -Sensibilité au bruit ambiant, -Diagnostic souvent difficile à réaliser, Problèmes de répétitivité des mesures. 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

Tableau II.3 : Principaux avantages et inconvénients des différentes méthodes d'analyse [14]

II.2.7. Différents types de la maintenance conditionnelle :

Il existe deux types de maintenance conditionnelle :

II.2.7.1. Maintenance conditionnelle off-line :

C'est un suivi périodique (off-line) de l'évolution des paramètres (vibratoires par exemple), souvent accompagné, dans le même temps, de la surveillance d'autres paramètres (analyse de lubrifiant, performances, appréciations sensorielles, etc.). Ceci permet de détecter l'apparition des défauts à évolution lentes. La périodicité des relevés est variable (entre 2 semaines et 6 mois suivant l'importance et le coût des machines en cause).

II.2.7.2. Maintenance conditionnelle on-line :

C'est un suivi continu (on-line), il permet de suivre l'évolution de l'ensemble des paramètres il présente, en plus, l'avantage de détecter des défauts à évolution rapide et d'assurer la sécurité des installations par l'arrêt de la machine à l'approche d'un seuil réputé dangereux. Seules les défaillances de type explosif (perte brutale d'aubages de turbine ou compresseur axial, par exemple), ne sont pas détectable de manière précoce, mais le déclenchement d'une alarme de la machine dès leur apparition peut limiter les dégâts consécutifs à ces défaillances. [33]

II.2.8. Mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle :

La mise en place d'un programme de maintenance prévisionnelle et sa pérennité nécessitent une préparation minutieuse qui peut se scinder en trois phases : l'étude de faisabilité, le choix des acteurs et le démarrage du programme. La méthodologie de la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle est proposée, en plusieurs étapes successives qui permettent de poser le problème de la maintenance conditionnelle à partir d'une défaillance à prévenir avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance et de préparer l'intervention préventive conditionnelle:

- Sélection des défaillances à prévenir,
- Sélection d'un (ou n) paramètre physique descriptif de l'évolution du défaut,
- Choix du mode de collecte des informations,
- Suivre le paramètre descriptif dans le temps à l'aide de courbes de tendance

Maintenance des éoliennes et identification des composantes critiques

(Maintenance continue ou périodique, périodicité à définir),

- Choix du traitement de l'information,
- Établir des seuils limites d'avertissement (pré- alarme),
- Établir le diagnostic de défaut,
- Prédire la date de bris (extrapolation de courbes),
- Commander les pièces de rechange,
- Organisation d'Ipc,
- Bilan d'efficacité et retour d'expérience. [43]

II.2.9. Conclusion :

Ce chapitre a mis en œuvre en première partie la maintenance d'une manière générale, et en deuxième présente la maintenance des éoliennes et les principales composantes considérées critiques.

L'analyse de criticité réalisée à l'aide de la méthode PIEU a conclu que les roulements de l'alternateur de la boîte de vitesse étaient les plus susceptibles de tomber en panne et entraînaient les temps d'arrêt les plus longs pour l'éolienne ce qui nécessite une maintenance conditionnelle qui a été choisie comme le meilleur type de maintenance à appliquer pour un bon diagnostic.

Dans le chapitre suivant, nous allons proposer un pronostic pour ces roulements.

CHAPITRE III :

PRONOSTIQUE DES DEFAUTS DES ROULEMENTS PAR « RNA »

III. Introduction :

Certaines spécificités du domaine éolien rendent la tâche plus complexe lorsqu'il s'agit de proposer une méthode de surveillance, l'une des façons d'améliorer la disponibilité des éoliennes est de réduire les temps d'arrêt causés par les défaillances imprévu des composants, et déduire sa durée de vie utile restante RUL. Les systèmes de maintenance conditionnelle se sont avérés être un outil utile pour aider à la gestion de la maintenance des éoliennes. Plusieurs chercheurs ont présenté différents modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels pour la surveillance de l'état des composants d'une éolienne.

Ce chapitre est décomposé en trois parties :

- La première partie illustre en général les roulements.
- La deuxième partie présente la définition du PHM, ensuite introduit le pronostic, ses approches et ses méthodes.
- La troisième partie est consacrée à l'étude d'une approche de pronostic basée sur l'intelligence artificielle (méthode RNA).

III.1 Les roulements :

III.1. 1. Définition :

Un roulement est un élément mécanique qui s'interpose entre deux parties d'une machine dont l'une est tournante et l'autre est fixe. Le roulement a été utilisé depuis longtemps, mais sous une forme simpliste. Le premier à avoir établi un dessin pour le roulement à billes est Léonard DE VINCI (XV^{ème} siècle) qui fut ainsi considéré comme l'inventeur du roulement moderne. Aujourd'hui, les roulements prennent des formes plus développées et plus variées et leur utilisation au sein des machines tournantes devient une nécessité absolue. Ceci explique bien l'intérêt actuel qu'on leur accorde.

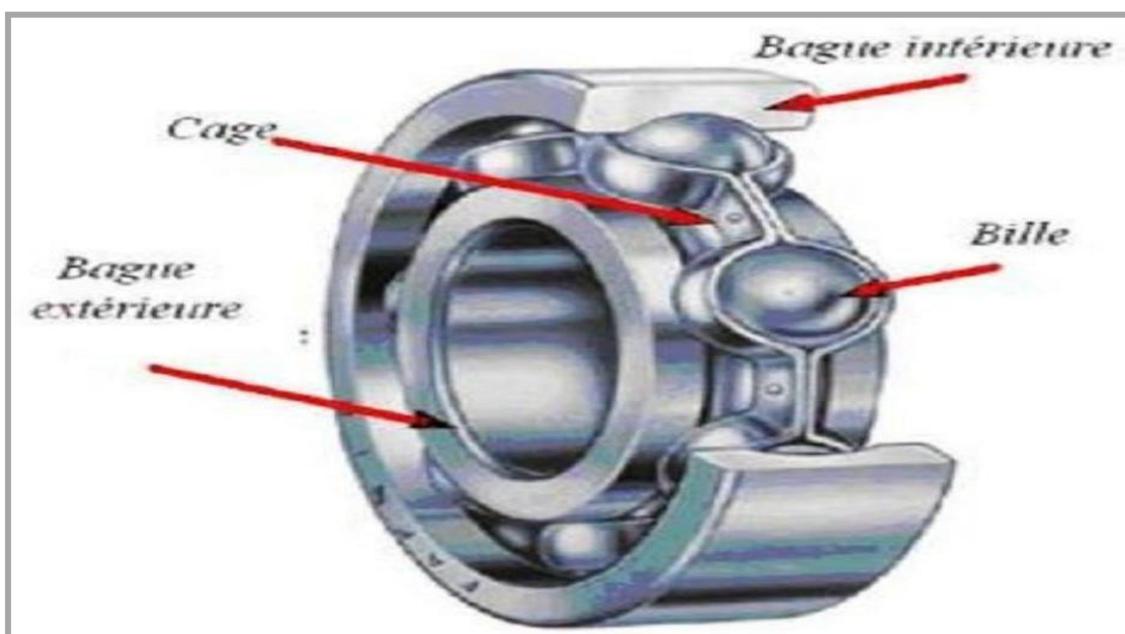


Figure III.1 : Eléments de roulement .[17]

- **La bague extérieure** : C'est l'élément qui limite les dimensions extérieures du roulement, elle sera montée dans un logement fixe (bague extérieure fixe) ou dans un moyeu tourne (bague extérieure tournante).
- **La bague intérieure** : Elle est montée sur un arbre fixe ou mobile. C'est-à-dire, elle est fixe si la bague extérieure est mobile, et le contraire.
- **Les éléments roulants** : Il s'agisse des billes, rouleaux et des aiguilles. Ce sont les éléments des roulements qui assurent la transmission de la charge entre les deux bagues du roulement, ils sont responsables de la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre. [17]

Pronostic des défauts des roulements par « RNA »

- **La cage** : Elle a pour rôle de maintenir le même écartement entre les éléments roulants, à fin de préserver la même zone de charge du roulement, elle ne supporte aucune charge.

III.1.2. Principaux types de roulements :

III.1.2.1. Roulements à une rangée de billes à contact oblique :

Dans le roulement à une rangée de billes à contact oblique, l'angle de contact des billes sur les pistes donne une capacité de charge axiale importante. Ce type de roulement peut supporter des charges axiales pures ou des charges combinées à condition que la proportion charge axiale sur charge radiale restent supérieure à une valeur qui dépend de l'angle de contact. Habituellement, les roulements à une rangée de billes ne sont pas démontables. Le chemin de roulement de la bague extérieure comporte deux épaulements inégaux dont l'un assez faible permet à la bague extérieure de passer, soit grâce à un chauffage préalable ou éventuellement par tension élastique, sur le jeu de billes monté sur la bague intérieure. Ces roulements sont en général montés par paires en oppositions et ils conviennent pour de grandes vitesses de rotation et demandent une bonne coaxialité des portées de l'arbre d'une part et des alésages des logements d'autre part. (Figure III.2) [16]



Figure III.2 : Roulement à une rangée contact oblique. [34]

- **Utilisations principales** : moteurs électriques verticaux avec charge axiale, paliers de butée de pompes, machines outils, roues avant d'automobiles, etc. [16]

III.1.2.2. Roulements à rotule sur deux rangées de billes :

Ce roulement comporte deux rangées de billes roulant sur deux pistes de la bague intérieure et dans la même piste sphérique de la bague extérieure.

Grâce à cette construction, la bague intérieure et son jeu de billes peuvent osciller librement autour du centre du roulement. Cette faculté a une grande importance lorsqu'il est difficile d'obtenir un parallélisme rigoureux entre l'arbre et le logement (montage dans des paliers indépendants par exemple). Cette possibilité de déversement est limitée à quelques degrés (de l'ordre de deux degrés, ce qui est suffisant) car les billes ne doivent pas venir au bord de la piste sphérique de la bague extérieure. Le contact des billes avec la piste de la bague extérieure est par contre moins favorable que dans un roulement rigide et la capacité de charge est donc relativement moins grande.

Ce type de roulement peut supporter des charges radiales avec, pour les séries larges, une charge axiale modérée. Ce roulement existe avec alésage cylindrique ou conique pour montage avec manchon de serrage. (Figure III.3) [16]



Figure III.3: Roulement à rotule de billes à contact oblique Sur deux rangées de billes. [35]

- **Utilisations principales :** paliers de transmission, ventilateurs centrifuges, etc.
[16]

III.1.2.3. Roulements à une rangée de rouleaux cylindriques :

Ces roulements existent en diverses exécutions qui diffèrent par le nombre et la position des épaulements latéraux des bagues. Dans les exécutions les plus courantes, il permet le déplacement axial d'une bague par rapport à l'autre. Ceci est intéressant, notamment dans le cas où l'arbre se dilate sous l'effet de variations de température et également pour le montage et le démontage, en particulier si les conditions de fonctionnement nécessitent un ajustement serré sur l'arbre et dans le logement. La forme des génératrices des rouleaux et des chemins de roulements permet un léger déversement (de l'ordre de une à deux minutes).

Ce roulement peut supporter des charges radiales assez élevées mais pas de charges axiales, sauf dans le cas des roulements NJ ou NUP. Il convient aux grandes vitesses. (Figure III.4) [16]



Figure III.4: Roulement à rangée de rouleaux cylindriques.[36]

- **Utilisations principales :** moteurs électriques, turbocompresseurs, ventilateurs, boîtes de vitesses, etc. [16]

III.1.2.4. Roulements à deux rangées de rouleaux cylindriques :

Ce type de roulement offre à la fois une grande capacité de charge radiale et une faible déformation élastique, les roulements n'admettant aucun déversement.

Ce roulement est réalisé par SKF avec un alésage, cylindrique ou conique, qui permet de réduire le jeu interne du roulement au montage. Les broches de machines-outils, dans lesquelles les charges radiales sont supportées par des roulements à rouleaux cylindriques, sont généralement munies de butées à billes à contact oblique pour supporter les charges axiales. (Figure III.5) [16]



Figure III.5: Roulement à deux de rouleaux cylindriques [35]

III.1.2.5. Roulements à aiguilles :

Les roulements à aiguilles comportent des éléments roulants cylindriques d'un diamètre relativement petit par rapport à leur longueur. Ayant une faible hauteur de section, ils conviennent bien dans les applications où l'espace radial disponible est limité. Leur capacité de charge est relativement élevée. [16]



Figure III.6 : Roulements à aiguilles.[37]

III.1.2.6. Roulements à rouleaux coniques :

Les rouleaux de ce roulement sont rigoureusement coniques. Leur grande base rectifiée, sphérique, s'appuie contre un épaulement de la bague intérieure.

Les génératrices des rouleaux et du chemin de roulement de la bague intérieure ont un même sommet sur l'axe du roulement. En construction, les génératrices des chemins et des rouleaux ne sont pas absolument droites, le contact linéaire ainsi modifié permet dans des conditions de fonctionnement normal un léger déversement relatif des deux bagues (de l'ordre de deux minutes).

Ses propriétés sont les mêmes que celles du roulement à une rangée de billes à contact oblique. Il peut supporter des charges plus élevées (contact linéaire), mais sa limite de vitesse est plus basse. Ces roulements sont en général montés par paires en opposition.

Après réglage, un certain jeu minime doit subsister. Les variations de température influencent le réglage et par-là le jeu. Ces roulements ne sont donc généralement employés que si la distance entre eux est relativement faible.

La bague extérieure, appelée cuvette, est démontable.

La bague intérieure avec sa cage et ses rouleaux est aussi appelée cône. (Figure III.7) [16]



Figure III.7: Roulement à rouleaux conique [38]

- **Utilisations principales :** machines-outils, réducteurs, roues et ponts d'automobiles, roues folles de wagonnets, etc. [16]

III.1.3. Défaut de roulement :

Les défauts de roulements à une incidence sur les vibrations du système, car les roulements sont des organes de liaisons et de rigidité. Les vibrations générées au sein d'un roulement sont de faible amplitude, ressemblant à un bruit aléatoire. Lors de l'apparition d'une avarie, une impulsion se produit chaque fois que le défaut participe à un contact. L'avarie a donc une fréquence caractéristique qui dépend de la géométrie du roulement et de l'emplacement de l'écaillage (sur la bague intérieure, sur la bague extérieure ou sur un élément roulant).

Cependant, les amplitudes des vibrations induites par les défauts ne sont pas d'un niveau très élevé. Elles sont noyées parmi les composantes plus énergétiques du système comme celles des engrenages ou celles liées à un déséquilibre ou un balourd. [18]

Pronostic des défauts des roulements par « RNA »

Pour réaliser un pronostic efficace à partir d'un certain spectre, on peut donc utiliser un certain nombre de fréquences caractéristiques ou fréquences de défauts qui sont les suivantes :

- Fréquence caractéristique de la bague intérieure (BPFI)

$$\frac{fb}{2} * \left(1 + \frac{d}{e}(\cos\alpha)\right) \dots\dots\dots \text{(III.1)}$$

- Fréquence caractéristique de la bague extérieure (BPFO)

$$\frac{fb}{2} * \left(1 - \frac{d}{e}(\cos\alpha)\right) \dots\dots\dots \text{(III.2)}$$

- Fréquence caractéristique de la cage (CPF)

$$\frac{f}{2} * \left(1 - \frac{d}{e}(\cos\alpha)\right) \dots\dots\dots \text{(III.3)}$$

- Fréquence caractéristique des billes (BFF)

$$\frac{ef}{d} * \left(1 - \left(\frac{d}{e}\right)^2 \cos^2(\alpha)\right) \dots\dots\dots \text{(III.4)}$$

Avec :

- f : fréquence de rotation de l'arbre
- b : diamètre de la bille
- e : diamètre moyen du roulement
- b : nombre de billes du roulement
- α : angle de contact

III.2 : généralités sur la pronostic/diagnostic :

III.2.1. Terminologie de base liée au diagnostic/pronostic :

Défaillance : altération ou cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise. Il existe 2 formes de défaillance :

Défaillance partielle : altération de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

Défaillance complète : cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

Défaut : un défaut représente une déviation non acceptable d'au moins d'une propriété caractéristique ou d'un paramètre du système. Un défaut peut générer une défaillance du système. Après une défaillance, on considère que le système est en panne. [45]

Surveillance : On utilise les données provenant du système pour représenter l'état de fonctionnement puis en détecter les évolutions. Elle permet également de détecter et diagnostiquer les défauts et les erreurs dans le système. En cas de dysfonctionnement, elle informe le module de maintenance et le module de supervision [NARV07]. Les deux types de surveillance sont la surveillance de la commande et la surveillance du système opérant. [44]

Panne : inaptitude d'un dispositif à accomplir sa fonction. C'est la cause de l'apparition de symptômes. [44]

Le mode de défaillance : qui s'agit des éventuelles manières de « comment le système peut s'arrêter de fonctionner ou s'éloigner de la sûreté de fonctionnement ». [46]

La criticité : évaluation de la gravité des conséquences de la situation, afin de pouvoir identifier la méthode de cotation avec le chef de projet. [46]

III.2.2. Prognostic and Health Management" (PHM):

Le PHM est une discipline de science de l'ingénieur focalisée sur la détection, la prédiction et le management de l'état de santé des systèmes complexes. Cette discipline est transversale aux domaines de l'instrumentation, du traitement de données et des signaux, de la surveillance des systèmes jusqu'au développement d'un processus d'aide à la décision. L'objectif de cette discipline est d'optimiser le compromis de disponibilité d'un système tout en assurant la sécurité des biens et des personnes par une utilisation de la maintenance industrielle de manière adéquate. [19]

III.2.3. Architecture du PHM :

L'une des architectures développées les plus connues est appelée OSA/CBM *(Open System Architecture for Condition-Based-Maintenance).

Cette architecture intègre la transversalité des domaines intervenant dans la discipline PHM. Elle établit un cadre de communication entre le système, le système de surveillance et les différents experts concernés au travers de la maintenance industrielle.

Diverses architectures basées sur l'OSA/CBM ont été développées et appliquées à l'aérospatial, l'aéronautique, aux systèmes militaires, à l'électronique ou au nucléaire.

Une vision globale de cette architecture PHM est donnée par la **Figure III.8**. La connaissance nécessaire à priori de cette architecture dépend des mécanismes des relations de cause à effet menant à la dégradation et de leurs influences sur l'apparition des défaillances. Le deuxième élément concerne l'acquisition de données d'entrée (Conditions opérationnelles), de données de sortie (Données de comportement), ainsi que potentiellement des données sensibles à l'évolution de l'état de santé ou de dégradation d'un système.

L'étape suivante consiste à extraire des indicateurs de qualité de l'état de santé ou de dégradation, précurseurs de l'apparition de défaillances à partir des données acquises. Ces indicateurs peuvent être traités séparément ou encore être fusionnés avec d'autres indicateurs, afin de concevoir de nouveaux indicateurs possédant certaines propriétés recherchées.

L'étape de surveillance, de diagnostic et de pronostic consiste à fusionner intelligemment ces indicateurs, de sorte à obtenir une estimation de l'état global de santé ou de dégradation d'un système. Puis, deux stratégies peuvent être envisagées suivant l'état de santé du système.

Dans le cas de présence de défaillances sur le système, un processus de diagnostic est alors mis en place afin de détecter, de localiser et d'identifier le ou les composants en défaillance.

Dans le cas d'absence de défaillances, un processus de pronostic est mis en place en vue d'estimer le temps de vie restant suivant les conditions opérationnelles (Conditions de sollicitation et d'environnement), à partir d'un horizon de temps d'observation donné sur un système.

Enfin, les deux dernières étapes concernent l'aide à la décision pour maintenir la disponibilité d'un système, tout en assurant un compromis entre la sécurité et les coûts d'exploitation.

Certaines actions peuvent être entreprises comme la planification/réalisation d'actions de maintenance suivant les impératifs d'exploitation associés au système. [19]

Pronostic des défauts des roulements par « RNA »

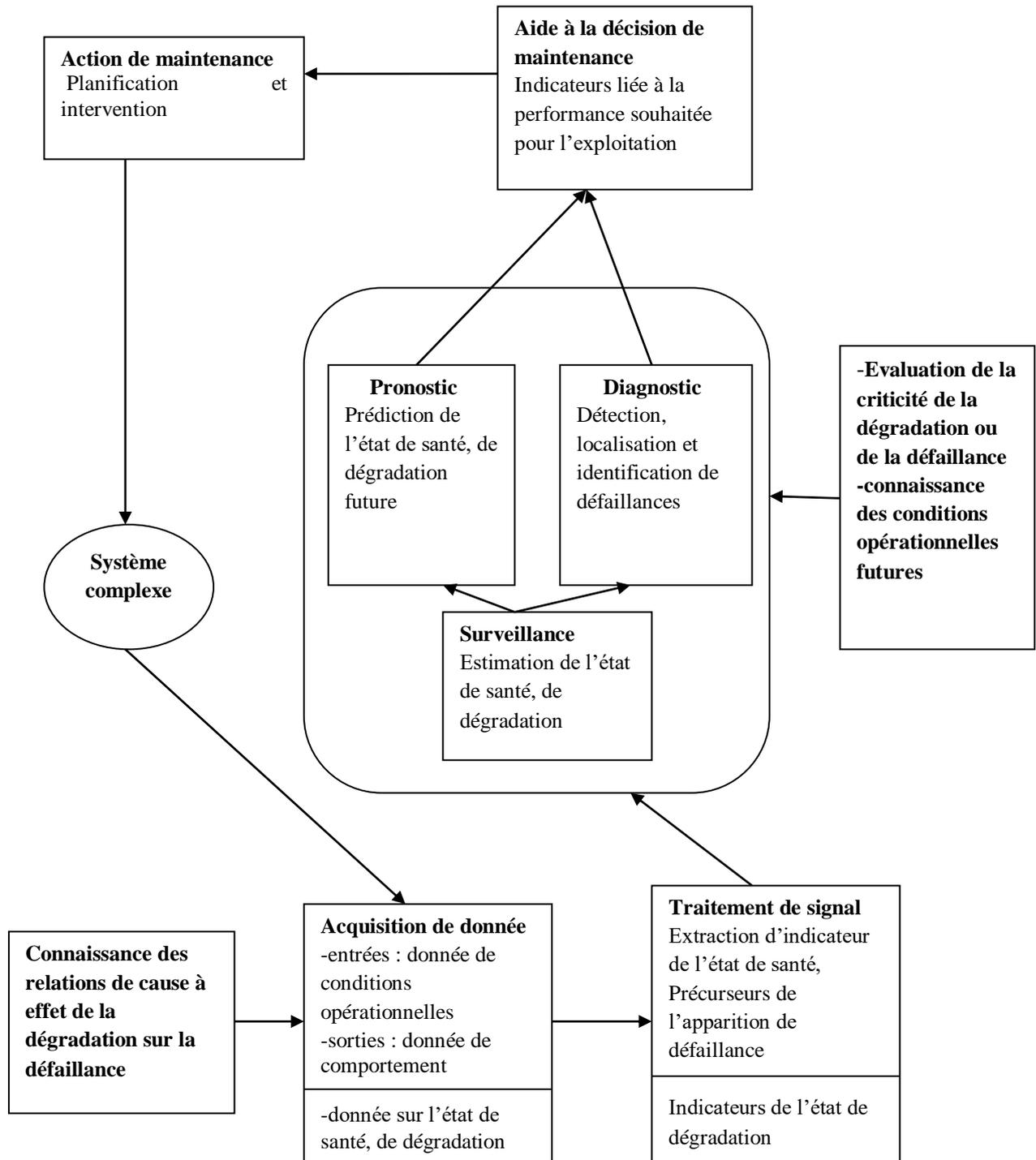


Figure III.8: architecture Prognostic and Health Management [19]

III.2.4. Description des étapes de l'architecture PHM :

Cette sous-section a pour objectif de décrire plus précisément l'ensemble des étapes constituant l'architecture PHM dans lequel on distingue :

- a. Connaissance à priori des défaillances
- b. Acquisition de données
- c. Traitement des données
- d. Diagnostic et pronostic [19]

III.2.5. Diagnostic et pronostic :

III.2.5.1. Définition de pronostic :

Le terme pronostic provient du grec « progignôskein » qui signifie : connaître à l'avance. C'est une notion essentiellement utilisée en médecine où il concerne la prévision, après le diagnostic, du degré de gravité et de l'évolution ultérieure d'une maladie, y compris son issue, en se référant à l'évolution habituellement observée pour des troubles similaires chez de nombreux autres patients. La définition précédente est transposable dans le cadre de la maintenance prévisionnelle de systèmes industriels, à condition de remplacer le patient par une machine. Ainsi, le rôle du pronostic consiste à prédire quel pourrait être l'état d'une installation industrielle dans le futur, au vu de son état actuel et passé. Plusieurs définitions sont proposées pour en préciser la finalité.

La norme ISO 13381-1 décrit de façon standard ce que devrait être le processus de pronostic: Estimation de la durée de fonctionnement avant défaillance et du risque d'existence ou d'apparition ultérieure d'un ou de plusieurs modes de défaillance. La durée de fonctionnement avant défaillance est communément appelée RUL (Remaining Useful Life). [22]

III.2.5.2. définition de diagnostic :

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Cette définition résume les deux tâches essentielles du diagnostic : l'observation des symptômes de la défaillance et l'identification de la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations du système. Les deux étapes d'une méthode de diagnostic sont donc la localisation et l'identification des fautes sur les équipements responsables d'une ou plusieurs défaillances du système. L'étape de localisation permet d'isoler les équipements en panne, c'est-à-dire dans lesquels une faute est apparue.

L'étape d'identification détermine le type de défaut apparue. Une fois le type de faute identifié et selon la connaissance disponible sur le système, il est parfois possible de propager les effets d'une faute sur les équipements du système afin de prédire les conséquences de ces défaillances. [20]

III.2.5.3. Méthodes de diagnostic

Plusieurs techniques permettent de diagnostiquer les fautes survenant dans un système qui provoquent des défaillances. Ces techniques reposent surtout sur la connaissance disponible sur le système. Cette connaissance dépend des techniques de surveillance du système et d'une référence illustrant le fonctionnement normal (comportement nominal) ou le fonctionnement anormal (comportement en présence de faute) du système. Cette référence est représentée soit par un historique, une expérience, soit par un modèle connu ou estimé du comportement du système. Une classification des méthodes de diagnostic est proposée dans la Figure III.9 [20]

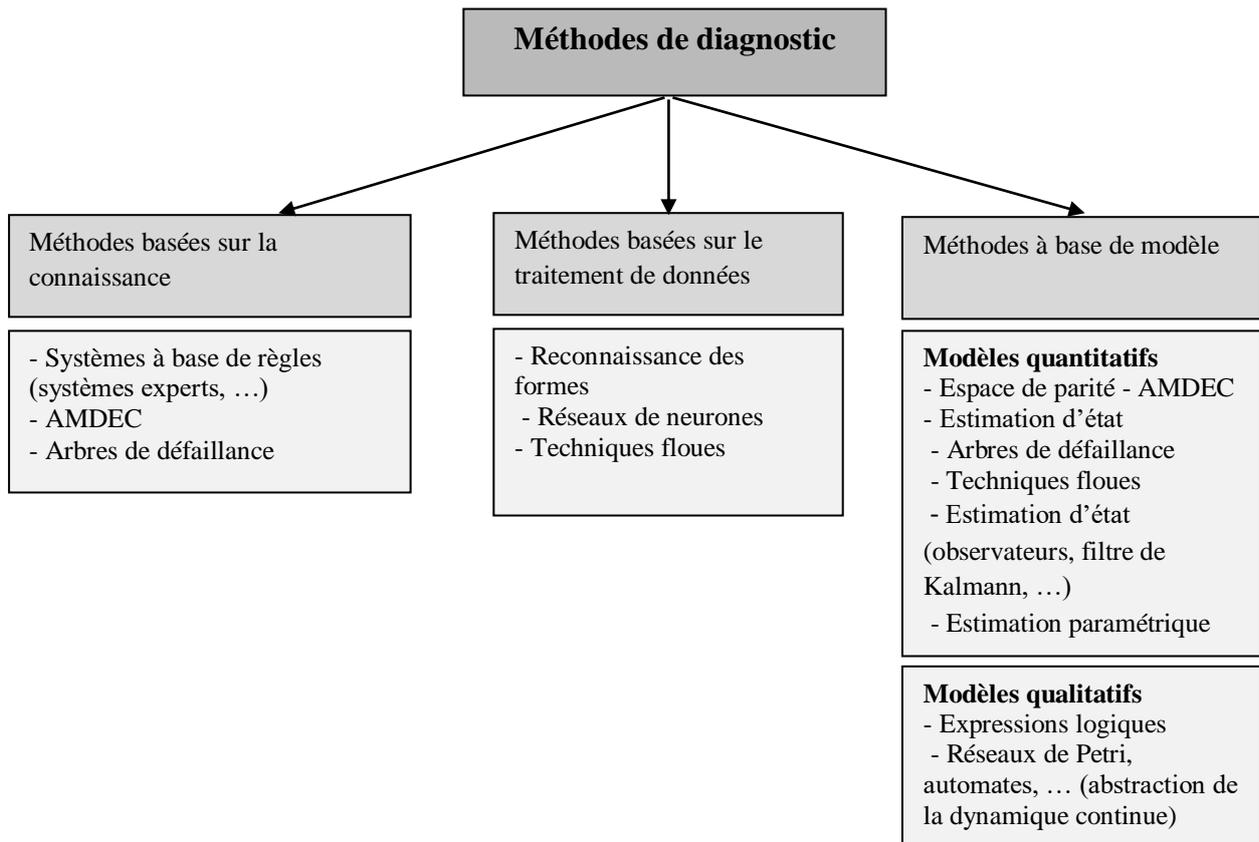


Figure III.9 : Classification des méthodes de diagnostic [20]

III.2.6. Lien entre pronostic et diagnostic :

Le processus de diagnostic intervient généralement au moment de l'apparition d'un défaut et/ou dans l'intervalle entre la défaillance du système et la défaillance des systèmes secondaires.

Toutefois, si un défaut naissant peut être détecté à un stade précoce, alors les opérations de maintenance pourront être retardées jusqu'à ce que l'état du système évolue vers un état plus dégradé. Cet intervalle, entre la détection d'un défaut naissant et son apparition, définit le domaine (temporel) du pronostic. Fournir un intervalle suffisant, communément appelé temps de vie restant, entre la détection du défaut naissant et la défaillance du système, permet de mieux exploiter le système et réduire d'avantage les opérations de maintenance. [21]

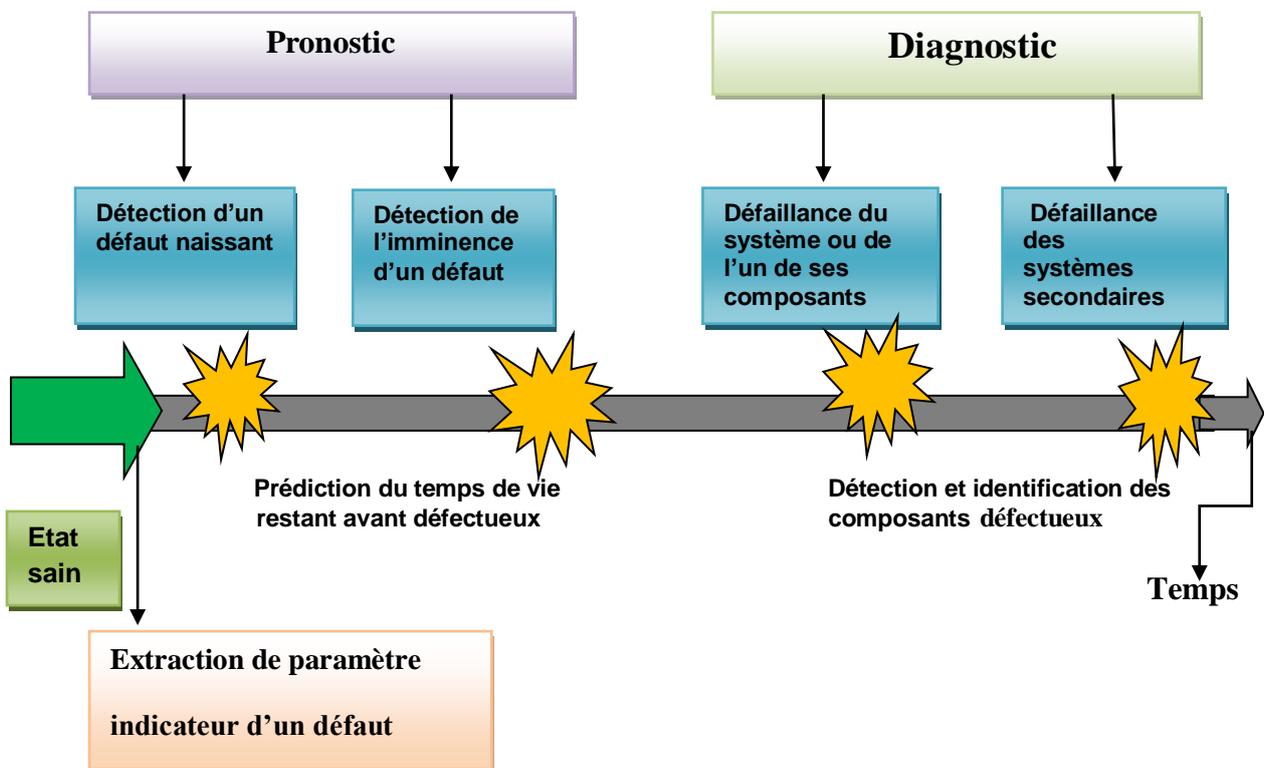


Figure III.10 : pronostic vs diagnostique [21]

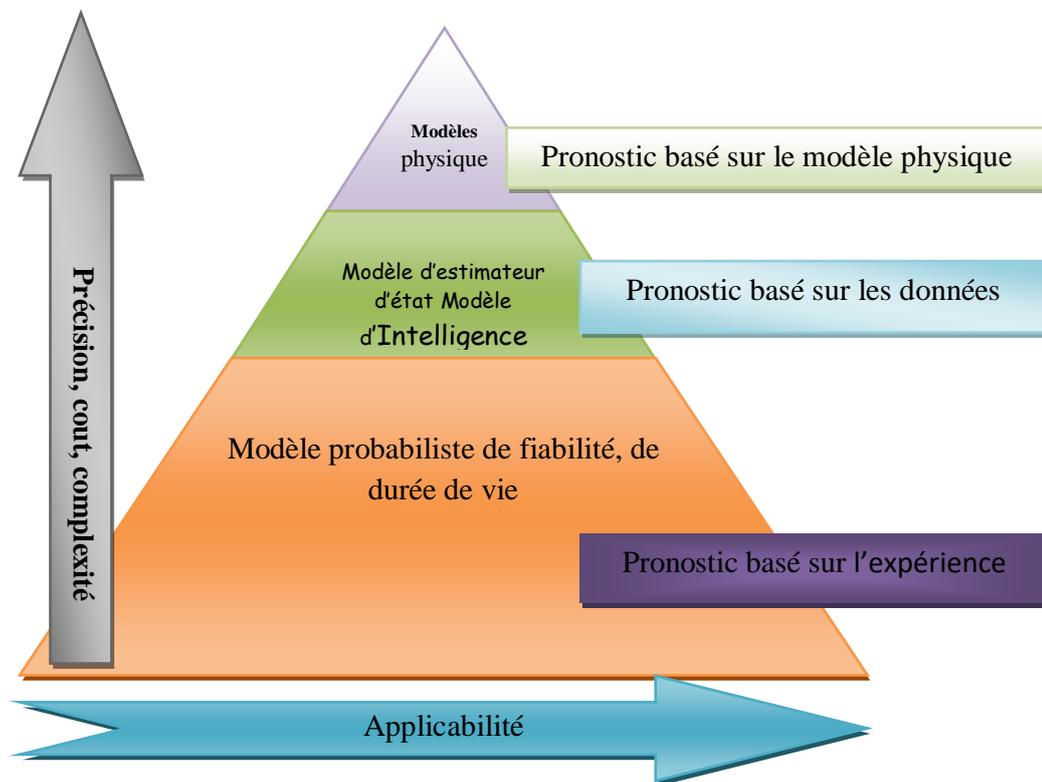
III.2.7. Classification des méthodes de pronostic :

De nombreux outils et méthodes de pronostic de défaillances ont été proposés durant la dernière décennie. Elles diffèrent généralement par le type d'application considérée, alors quelques outils mis en œuvre dépendent principalement de la nature des données et connaissances disponibles pour construire un modèle de comportement du système réel

Pronostic des défauts des roulements par « RNA »

incluant le phénomène de la dégradation. Aussi, ces méthodes et outils peuvent être regroupés dans un nombre limité d'approches.

Lebold et Thurston ont proposé un premier classement des approches de pronostic. Dans leur papier, les auteurs suggèrent une classification pyramidale la figure III.11 à trois niveaux des approches de pronostic : les approches fondées sur l'expérience, celles guidées par les données, et les approches fondées sur les modèles. Pour dissocier ces trois types d'approche, les critères suivants sont considérés : le coût et la complexité de mise en œuvre, la précision des résultats obtenus, et l'applicabilité des approches



La Figure III.11 : Classification d'approches de Pronostic

III.2.7.1. Pronostic basé sur un modèle physique :

Le pronostic basé sur un modèle physique utilise des représentations mathématiques pour intégrer une compréhension physique du processus de dégradation du système.

Le principe du pronostic basé sur les modèles physiques est de déterminer le niveau de dégradation courante du système (grâce aux processus de surveillance et de diagnostic) et d'évaluer le temps restant avant la défaillance en utilisant la courbe d'évolution de la dégradation en fonction de la sollicitation du système. Un schéma conceptuel du pronostic basé sur un modèle est représenté sur la figure III.12. [21]

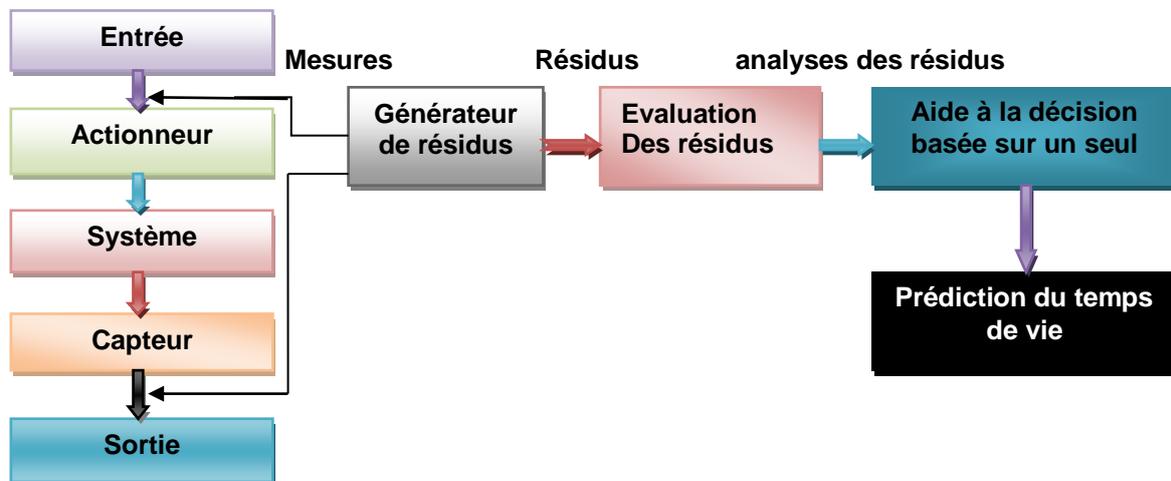


Figure III.12 : Structure d'un système de pronostic à base d'un modèle [21]

a. Les avantages de cette méthode :

- La flexibilité : si une des propriétés du système ou de la dégradation change le modèle peut être réajusté pour prendre en compte cette modification
- L'interopérabilité : la connaissance de la structure du modèle permet de relier la variation d'indicateurs à une modification de paramètre
- Meilleures performances de pronostic obtenues. [21]

b. Les inconvénients de cette méthode :

- Le développement des modèles est extrêmement coûteux. Cela nécessite un niveau de qualification élevé et une expérience certaine.
- Il est difficile de construire un modèle global pour les systèmes complexes : complexité de modélisation des interactions entre les différents mécanismes, difficultés de calcul associées à la résolution d'un système d'équations différentielles.

Pronostic des défauts des roulements par « RNA »

- Il peut être impossible de généraliser une méthode basée sur un modèle physique orienté « composant » à un niveau « système »
- Il est nécessaire de connaître les mécanismes de dégradation et les facteurs influents sur celle-ci. [21]

III.2.7.2. Pronostic basé sur l'expérience :

Les approches de pronostic basées sur l'expérience se fondent sur la modélisation stochastique des phénomènes de dégradation (loi de fiabilité, processus markoviens, ou non markoviens). Ces modèles peuvent être construits sur la base d'expériences similaires passées. Les approches basées sur l'expérience sont principalement issues des méthodes traditionnelles de modélisation et de traitement fiabilistes. Le pronostic est en ce sens assimilé à une étude de fiabilité prévisionnelle, l'objectif étant d'identifier les paramètres d'une distribution aléatoire décrivant le phénomène de dégradation ou de défaillance.

a. Les avantages de cette méthode :

Le principal avantage de ce type d'approches est qu'elles ne nécessitent pas de connaissance pointue des mécanismes physiques de dégradation, ces connaissances sont disponibles dans des nombreux domaines. Aussi, elles sont relativement simples à mettre en œuvre et peu coûteuses.

b. Les inconvénients de cette méthode :

- Il existe fréquemment un décalage entre les modèles mis au point (mono-composant à 2 états) et la réalité industrielle (système multi-composants à multi-états).
- Il est difficile de disposer d'un historique d'expérience passée représentatif de toutes les conditions d'utilisation des systèmes.
- Le manque de réactivité face au changement de comportement d'un système ou de l'environnement
- Nécessite un bon retour d'expérience.
- Intégration simplifiée des variations de conditions opérationnelles d'expertise

III.2.7.3. Pronostic orienté données :

Le pronostic guidé par les données se base sur l'hypothèse que les données de surveillance d'un système restent relativement inchangées jusqu'à l'apparition d'un défaut. Dans cette approche, la surveillance du système est effectuée à l'aide de paramètres de surveillance qui

Pronostic des défauts des roulements par « RNA »

indiquent la dégradation du système. Les données recueillies sont d'abord analysées pour détecter d'éventuelles anomalies. Ensuite l'évolution de la tendance des paramètres de surveillance est utilisée pour estimer le temps restant avant la défaillance du système en utilisant des algorithmes de prédiction. L'organigramme présenté sur la figure III.13 résume les étapes de la mise en œuvre d'un pronostic guidé par les données [21]

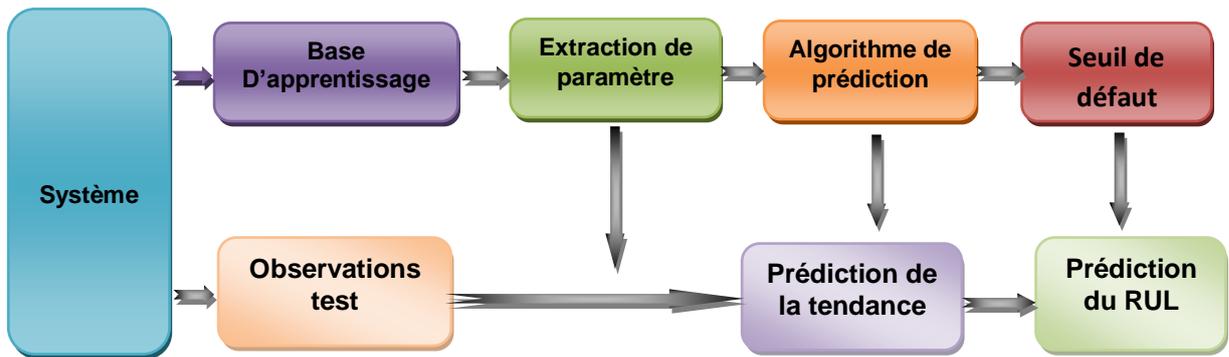


Figure III.13 : Structure d'un système de pronostic orienté données [21]

a. Technique statistique :

Les techniques statistiques les plus populaires sont les techniques de lissage (tel que le lissage exponentiel) et les techniques d'analyse des séries temporelles telles que les modèles de régression, notamment les modèles AR (Auto-Regressive) et ARMA (Auto-Regressive Moving Average models). Ces techniques sont aussi classées sous la catégorie, Analyse par tendance. Ces techniques présentent l'intérêt d'être simples à programmer. Cependant elles supposent que la dégradation du système est monotone, et ne permettent pas d'intégrer les variations des conditions d'utilisation du système, l'évolution de la dégradation à venir doit être similaire à celle qui a été apprise

b. Approche par analyse des séries temporelles :

Des quantités suffisantes de données en fonction du temps sont disponibles, les techniques d'analyse des séries temporelles sont souvent utilisées pour déterminer l'état du système en un point donné dans le futur. Ces techniques s'appuient fortement sur des données antérieures pour prédire les performances dans le futur.

c. Techniques de régression :

L'analyse par régression utilise les données existantes et détermine les relations, le cas échéant, entre le résultat mesurable et les variables qui contribuent à ce résultat. Un modèle général de régression linéaire est donnée par :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \dots + \beta_{p-1} x_{i,p-1} + \epsilon_i$$

..... (III.5)

- $i=1, \dots$
- Y_i Est une variable aléatoire indiquant la valeur de la réponse de l' i «eme» essai
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{p-1}$: Sont les paramètres estimés
- $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,p-1}$: Sont les valeurs du prédicteur.
- ϵ_i : Est l'erreur aléatoire de moyenne = 0.

d. Autorégressif moyenne mobile intégrée (ARIMA) :

Les séries temporelles autorégressives moyenne mobile intégrée (ARIMA) est une technique d'estimation d'état couramment utilisée dans le pronostic. Elle est également connue comme analyse par tendance. Le modèle ARIMA est une construction générique qui intègre des processus autorégressifs, processus moyenne mobile, et une capacité à rendre compte des données non stationnaires

e. Approches à base intelligences artificielle :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA), les algorithmes génétiques, la logique floue et autres techniques d'apprentissage automatique constituent une classe d'approches connue sous le nom approches d'intelligences artificielles (IA). Ces techniques ont la capacité d'apprendre en utilisant l'historique passé et ensuite tenter de prédire l'état ou le résultat quand un nouvel ensemble de données d'entrée est présenté. Par conséquent, ces techniques sont fréquemment utilisées dans les procédés actuels de pronostic. Leur force réside dans l'aptitude à apprendre et à capturer les relations subtiles entre données, même si ces relations sont inconnues ou difficile à décrire. En revanche, leur principal inconvénient réside dans l'acquisition et la couverture des données d'apprentissage.

III.2.7.3.1. Avantages et inconvénients de cette méthode :

- L'approche guidée par les données est relativement simple car elle ne requiert pas la connaissance formelle des mécanismes de dégradation
- Elle permet de transformer simplement des données bruitées en information pertinentes pour des décisions de pronostic
- Cette approche peut être adaptée à tout type d'application disposant de données suffisantes en quantité et en qualité.
- L'efficacité d'une approche de pronostic guidée par les données dépend fortement de l'existence de ces données opérationnelle par ailleurs.
- Le processus de surveillance conditionne également la justesse du pronostic par sa capacité à fournir une estimation fiable et précise de l'état de santé du système.
- Connaissance des mécanismes de dégradation directement incluse dans les données
- Nécessite des scénarios de dégradation pour différentes conditions opérationnelles.

[21]

III.3: pronostic des roulements avec la méthode des Réseaux Neurones Artificiels :

III.3.1. Le neurone :

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone.

L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angstroms (10^{-9} m) entre l'axone du neurone afférent et les dendrites. [23]

III.3.2 Définition de réseaux de neurones artificiels :

Aujourd'hui de nombreux termes sont utilisés dans la littérature pour désigner le domaine des réseaux de neurones artificiels, comme connexionnisme ou neuromimétique. Pour notre part, il nous semble qu'il faut associer à chacun de ces noms une sémantique précise. Ainsi, les réseaux de neurones artificiels ne désignent que les modèles manipulés ; ce n'est ni un domaine de recherche, ni une discipline scientifique. Connexionnisme et neuromimétique sont tous deux des domaines de recherche à part entière, qui manipulent chacun des modèles de réseaux de neurones artificiels, mais avec des objectifs différents. L'objectif poursuivi par les ingénieurs et chercheurs connexionnistes est d'améliorer les capacités de l'informatique en utilisant des modèles aux composants fortement connectés. Pour leur part, les neuromiméticiens manipulent des modèles de réseaux de neurones artificiels dans l'unique but de vérifier leurs théories biologiques du fonctionnement du système nerveux central. Notons qu'en France, dès 1982, des réunions de ces deux communautés ont été organisées, ce sont les Journées Neurosciences et Sciences de l'Ingénieur

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau. [41]

III.3.3 Qu'est-ce qu'un réseau de neurone artificiel ?

Les réseaux de neurones fonctionnent en répartissant les valeurs des variables dans des

automates (les neurones). Ces unités sont chargées de combiner entre elles leurs informations pour déterminer la valeur du paramètre de discrimination. C'est de la connexion de ces unités entre elles qu'émerge la capacité de discrimination du RNA. Chaque neurone reçoit des informations numériques en provenance de neurones voisins ; à chacune de ces valeurs est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque neurone effectue localement un calcul dont le résultat est transmis ensuite aux neurones aval. La famille de réseau majoritairement employé est le perceptron multi-couches (PMC). À lui seul ce type de réseau recouvre plus de 95 % des applications scientifiques et industrielles. Il comporte quelques dizaines à quelques centaines de neurones dans les cas usuels, voir plusieurs milliers pour les applications graphiques.

L'utilisation d'un RNA se fait en deux temps. Tout d'abord une phase d'apprentissage qui est chargée d'établir des valeurs pour chacune des connexions du réseau, puis une phase d'utilisation proprement dite, où l'on présente au réseau une entrée et où il nous indique en retour « sa » sortie calculée. [40]

III.3.4 Principe du neurone artificiel :

Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont ou des capteurs composant la machine dont il fait partie. A chacune de ses entrées est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval. A chaque connexion est associé un poids.

Il est commode de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la figure III.14. Cette représentation est à l'origine de la première vague d'intérêt pour les neurones formels, dans les années 1940 à 1970 (McCulloch et al. 1943), (Minsky et al. 1969). [22]

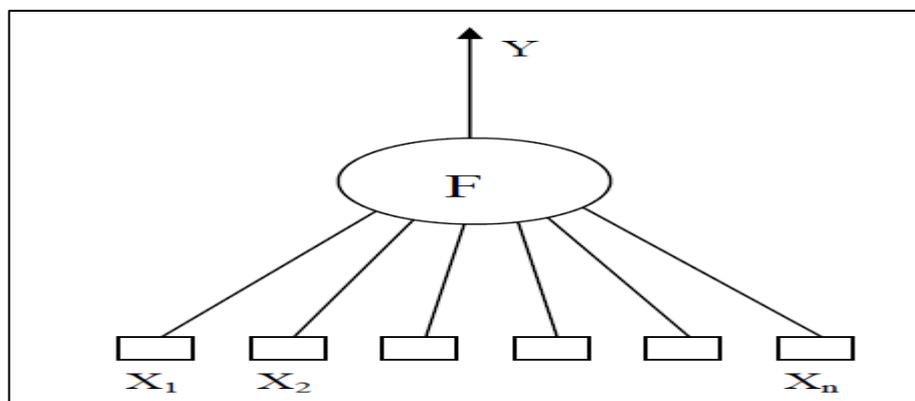


Figure III.14. Neurone artificiel.

III.3.5 Structure d'interconnexion des RNA :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité : [7]

III.3.5.1 Réseau multicouche :

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales. Chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie.

On appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Et les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées. [7]

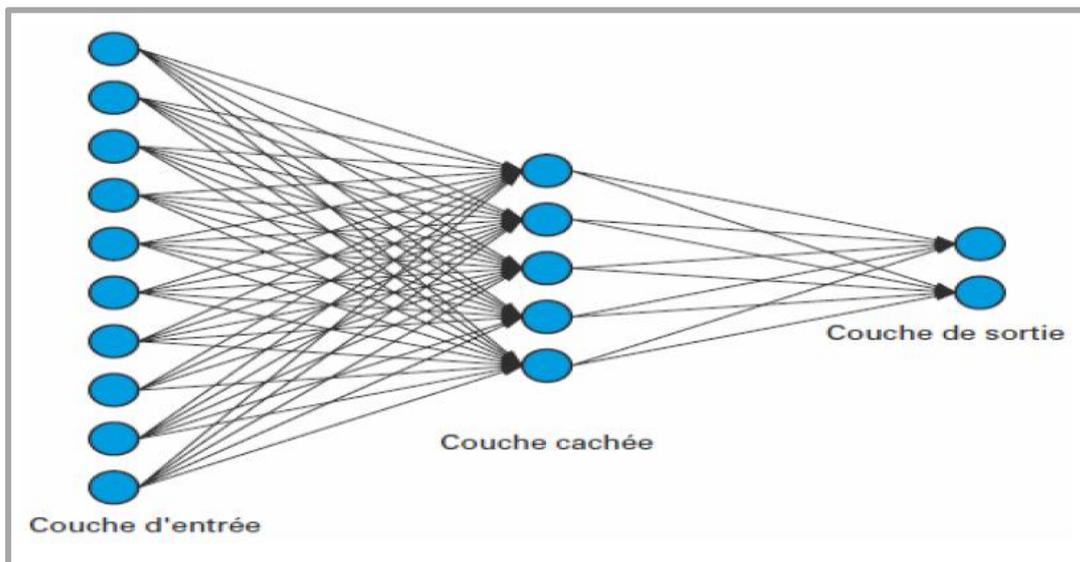


Figure III.15. Réseau multicouche classique [7]

III.3.5.2 Réseau à connexions locales :

Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale. Les connexions sont donc moins nombreuses de neurones de la couche avale. Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique. [7]

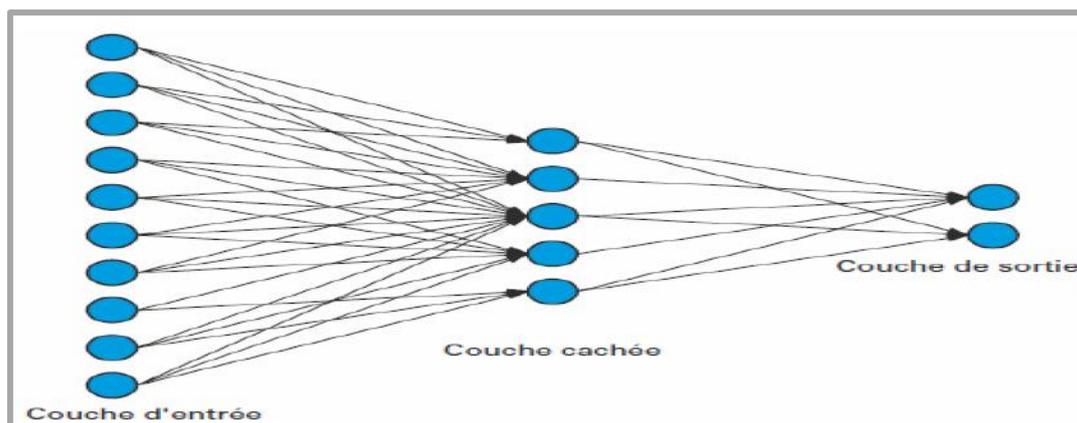


Figure III.16 : Réseau à connexions locales [7]

III.3.5.3 Réseau à connexions complexes :

Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau y compris lui-même, c'est la structure d'interconnexion la plus générale. [7]

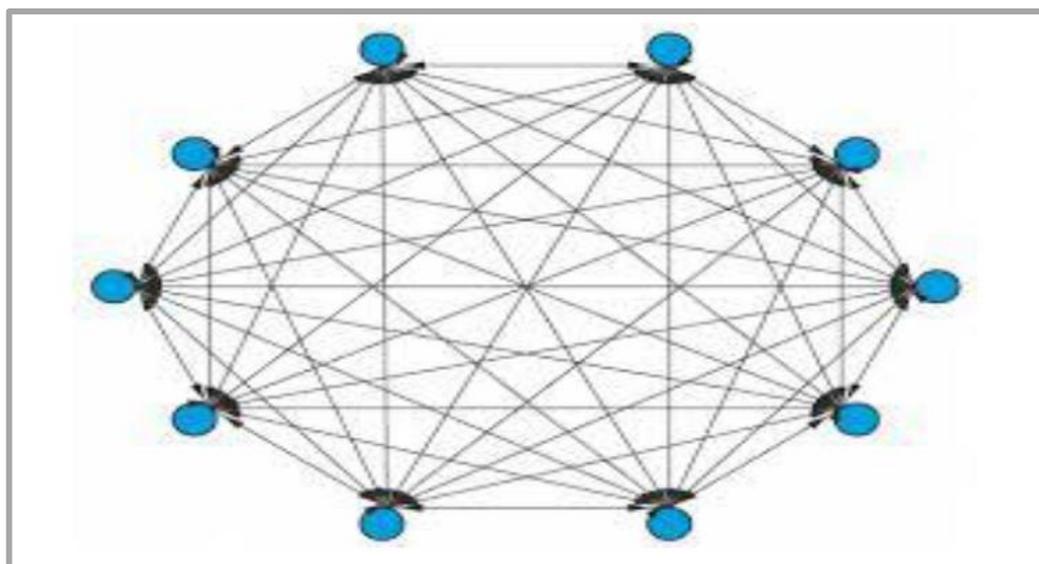


Figure III.17 : Réseau à connexions complexes [7]

III.3.6 Architectures d'un réseau de neurones artificiels :

Un réseau de neurones peut prendre des formes différentes selon l'objet de la donnée qu'il traite et selon sa complexité et la méthode de traitement de la donnée.

Les architectures ont leurs forces et faiblesses et peuvent être combinées pour optimiser les résultats. Le choix de l'architecture s'avère ainsi crucial et il est déterminé principalement par l'objectif.

On distingue deux structures de réseau, en fonction du graphe de leurs connexions, c'est-à-dire du graphe dont les nœuds sont les neurones et les arêtes les «connexions» entre ceux-ci :

- Les réseaux de neurones statiques (ou acycliques, ou non bouclés).
- Les réseaux de neurones dynamiques (ou récurrents, ou bouclés). [24]

Les architectures de réseau utilisées pour estimer la durée de vie restante peuvent être classées comme suit :

III.3.6.1 Réseaux Propagation vers l'avant « Feed forward » (statique) :

Un réseau de neurone "Feed-forward" appelé aussi réseau non bouclé ou unidirectionnels ou statique est présenté par un ensemble de neurones connectés entre eux telle que l'information circulant des entrées vers les sorties sans retour en arrière (dans un sens unique). Le calcul de la sortie se fait en propageant les calculs de la gauche vers la droite.

Dans lesquelles les entrées d'une couche particulière ne dépendent que des sorties de la couche précédente. Feed-forwarded fait tout simplement référence à la procédure du traitement de la donnée par le réseau neuronal. [41]

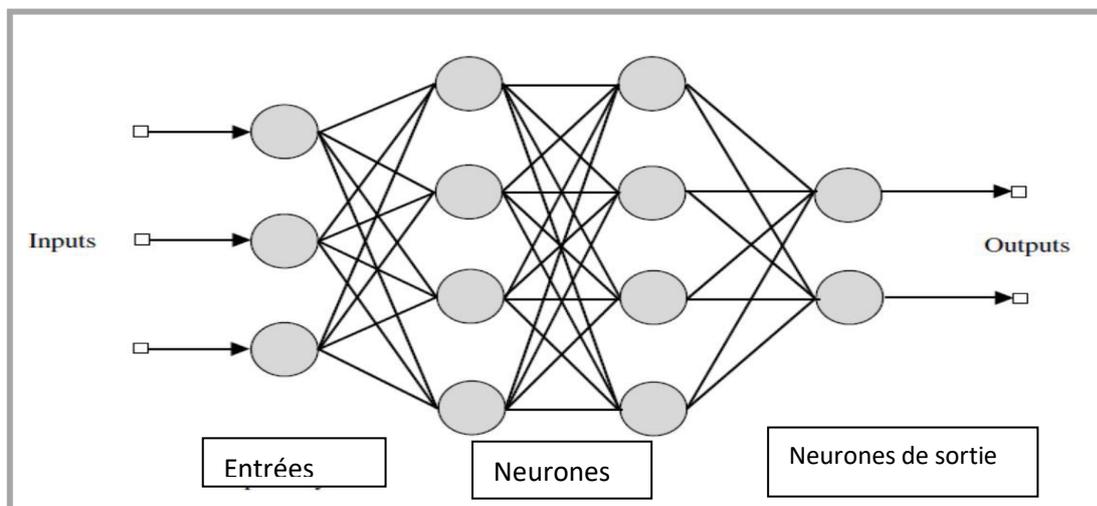


Figure III.18: Réseau de neurones Feed Forward

III.3.6.2 Les réseaux de neurones récurrents « feed-back » (dynamiques) :

Les Réseaux de Neurones récurrents traitent l'information en cycle. Ces cycles permettent au réseau de traiter l'information plusieurs fois en la renvoyant à chaque fois au sein du réseau.

La force des Réseaux de neurones récurrents réside dans leur capacité de prendre en compte des informations contextuelles suite à la récurrence du traitement de la même information. Cette dynamique auto-entretient le réseau.

Réseaux de neurones récurrents se composent d'une ou plusieurs couches. Le modèle de Hopfield (réseau temporel) est le réseau de neurones récurrent d'une seule couche le plus connu.

Les Réseaux de neurones récurrents à couches multiples revendiquent quant à eux la particularité de posséder des couples (entrée/sortie) comme les perceptrons entre lesquels la donnée véhicule à la fois en propagation en avant et en rétro propagation. [40]

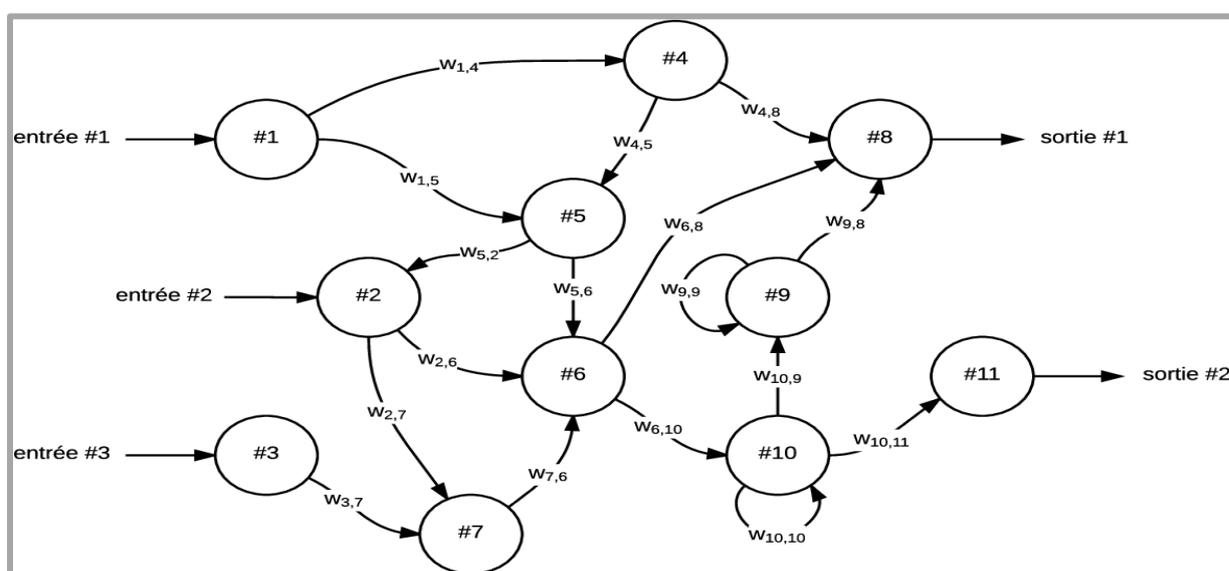


Figure III.19 : réseaux de neurones récurrents [40]

III.3.6.3 Les réseaux de neurones à résonance :

L'appellation du réseau neuronal fait encore une fois référence à son fonctionnement. En effet, au sein des réseaux de neurones à résonance, l'activation de tous les neurones est renvoyée à tous les autres neurones au sein du système. Ce renvoi provoque des oscillations, d'où la raison du terme résonance. [40]

III.3.6.4 Les réseaux de neurones auto-organisés :

Les Réseaux de neurones auto-organisés sont surtout adaptés pour le traitement de d'informations spatiales. Par des méthodes d'apprentissage non-supervisé, les réseaux

neuronaux auto-organisés sont capables d'étudier la répartition de données dans des grands espaces comme par exemple pour des problématiques de clustérisations ou de classifications.

Le modèle le plus connu de ce type de réseaux de neurones est sans doute la carte auto-organisatrice de Kohonen :

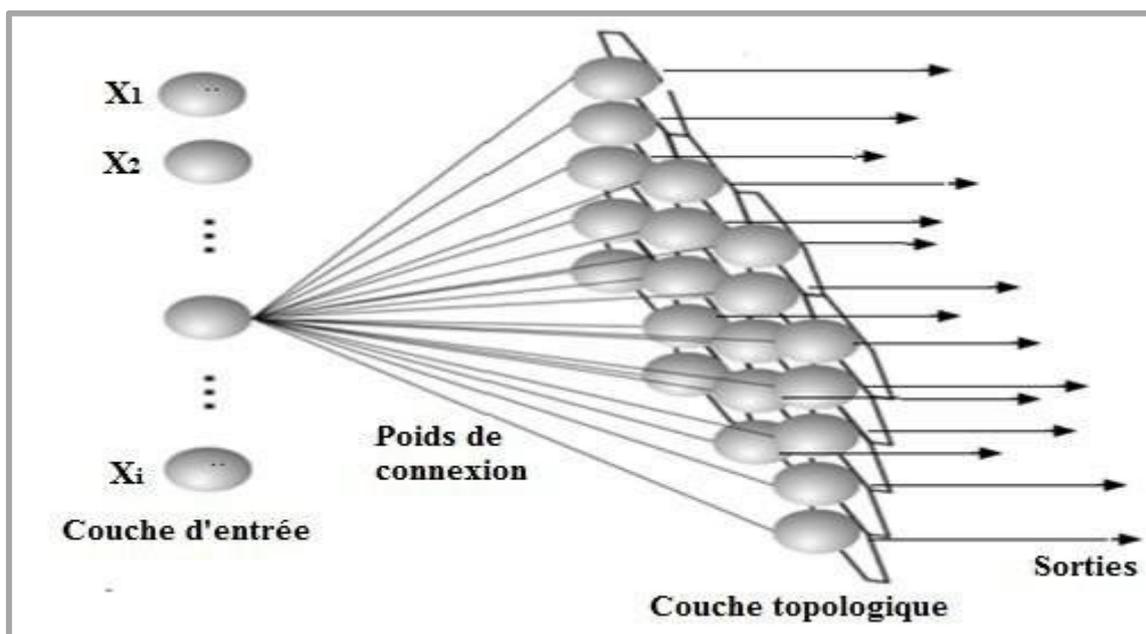


Figure III.20 : réseaux de neurones auto-organisés

III.3.7 Apprentissage des réseaux de neurones :

Le point crucial du développement d'un réseau de neurones est son apprentissage. Il s'agit d'une procédure adaptative par laquelle les connexions des neurones sont ajustées face à une source d'information [24]

Dans le cas des réseaux de neurones artificiels, on ajoute souvent à la description du modèle l'algorithme d'apprentissage. Le modèle sans apprentissage présente en effet peu d'intérêt.

Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions. L'apprentissage est la modification des poids du réseau dans l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience. Les poids sont initialisés avec des valeurs aléatoires. Puis des exemples expérimentaux représentatifs du fonctionnement du procédé dans un domaine donné, sont présentés au réseau de neurones. Ces exemples sont constitués de couples expérimentaux de vecteurs d'entrée et de sortie. Une méthode d'optimisation modifie les poids au fur et à mesure des itérations pendant lesquelles on présente la totalité des exemples, afin de minimiser l'écart entre les sorties calculées et les

sorties expérimentales. Afin d'éviter les problèmes de sur-apprentissage, la base d'exemples est divisée en deux parties : la base d'apprentissage et la base de test. L'optimisation des poids se fait sur la base d'apprentissage, mais les poids retenus sont ceux pour lesquels l'erreur obtenue sur la base de test est la plus faible. En effet, si les poids sont optimisés sur tous les exemples de l'apprentissage, on obtient une précision très satisfaisante sur ces exemples mais on risque de ne pas pouvoir généraliser le modèle à des données nouvelles. A partir d'un certain nombre d'itérations, le réseau ne cherche plus l'allure générale de la relation entre les entrées et les sorties du système, mais s'approche trop près des points et « apprend » le bruit.

Sur la ci-dessous, on peut observer qu'au début de l'apprentissage, pour les premières itérations, l'erreur sur la base d'apprentissage est grande et peut légèrement augmenter étant donné que les poids initiaux sont choisis aléatoirement. Ensuite, cette erreur diminue avec le nombre d'itérations. L'erreur sur la base de test diminue puis augmente à partir d'un certain nombre d'itérations. Les poids retenus sont ceux qui minimisent l'erreur sur la base de test. [24]

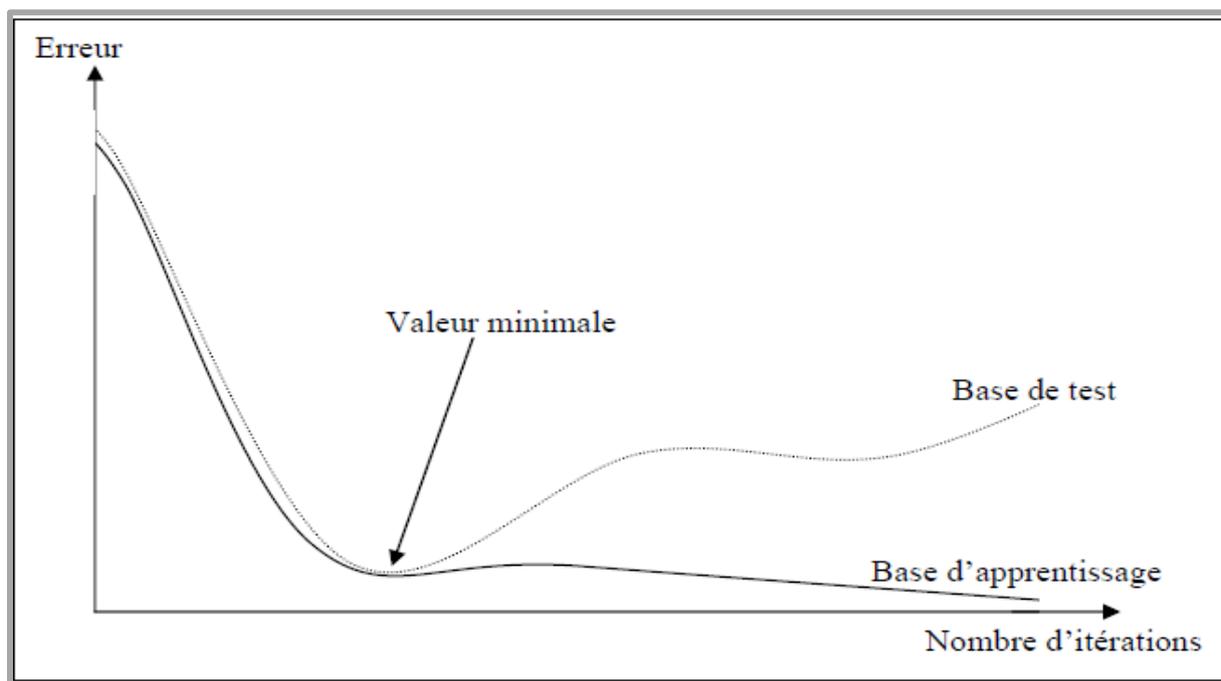


Figure III.21. Erreur moyenne sur la base d'apprentissage en fonction du nombre d'itérations. [24]

III.3.7.1 Type d'apprentissage :

Il existe de nombreux types de règles d'apprentissage qui peuvent être regroupées en trois catégories :

a. Apprentissage supervisé :

Un apprentissage est dit supervisé lorsque l'on force le réseau à converger vers un état final précis, en même temps qu'on lui présente un motif. Ce genre d'apprentissage est réalisé à l'aide d'une base d'apprentissage, constituée de plusieurs exemples de type entrées-sorties autrement dit les entrées du réseau et les sorties désirées ou encore les solutions souhaitées pour l'ensemble des sorties du réseau.

La procédure usuelle dans le cadre de la prévision est l'apprentissage supervisé qui consiste à associer une réponse spécifique désirée à chaque signal d'entrée. La modification des poids s'effectue progressivement jusqu'à ce que l'erreur entre les sorties du réseau et les résultats désirés soient minimisés. [24]

b. Apprentissage renforcé :

L'apprentissage renforcé est une technique similaire à l'apprentissage supervisé à la différence qu'au lieu de fournir des résultats désirés au réseau, on lui accorde plutôt un grade (ou score) qui est une mesure du degré de performance du réseau après quelques itérations. Les algorithmes utilisant la procédure d'apprentissage renforcé sont surtout utilisés dans le domaine des systèmes de contrôle. [24]

c. Apprentissage non supervisé :

L'apprentissage non supervisé consiste à ajuster les poids à partir d'un seul ensemble d'apprentissage formé uniquement de données. Aucun résultat désiré n'est fourni au réseau.

Dans ce cas L'apprentissage consiste à détecter les similarités et les différences dans l'ensemble d'apprentissage. Les poids et les sorties du réseau convergent, en théorie, vers les représentations qui capturent les régularités statistiques des données.

Ce type d'apprentissage est également dit compétitif et coopératif L'avantage de ce type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation reconnue comme une Auto-organisation, L'apprentissage non supervisé est surtout utilisé pour le traitement du signal et l'analyse factorielle.

Les règles d'apprentissage supervisé, non supervisé, et renforcé. Mais l'objectif fondamental de l'apprentissage reste le même : soit la classification, l'approximation de fonction ou encore la prévision. [24]

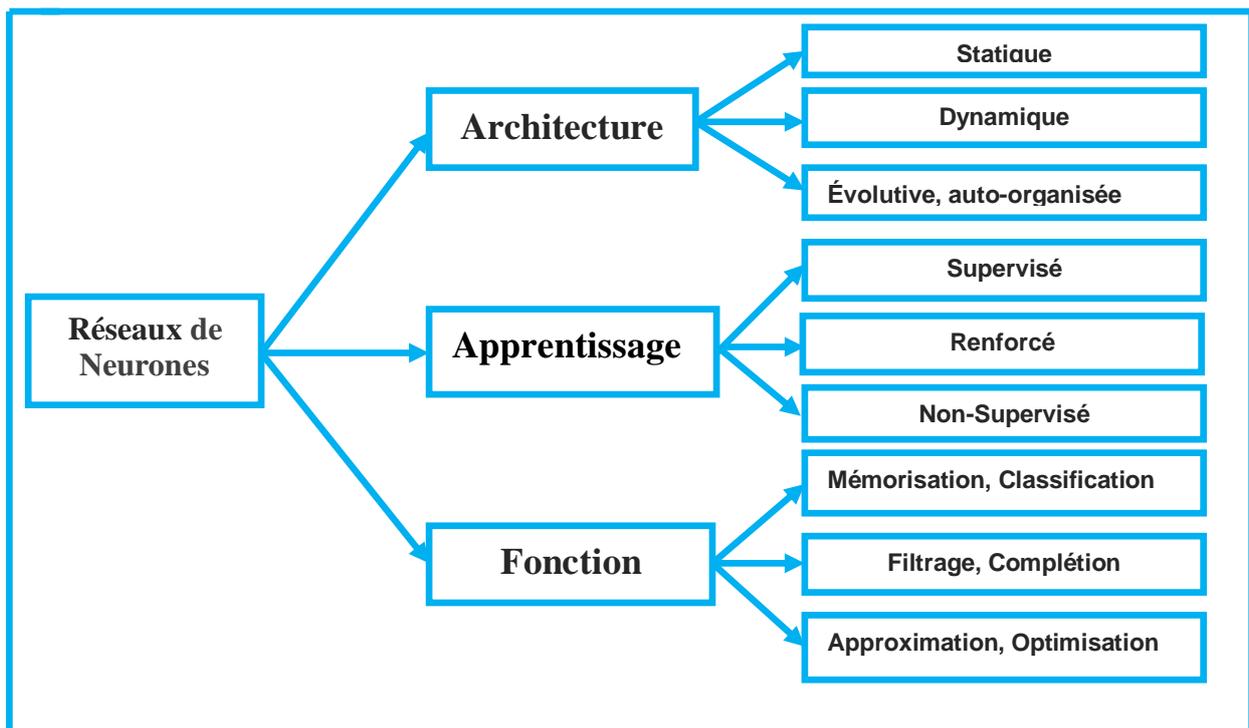


Figure III.22 différentes possibilités de classification des réseaux de neurones

III.3.8. Conception d'un réseau de neurones :

Les réseaux de neurones réalisent des fonctions non linéaires paramétrées. Leurs mises en œuvre nécessitent :

- La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est à dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- La collecte des données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones.
- La détermination du nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante.
- La réalisation de l'apprentissage
- L'évaluation des performances du réseau de neurones à l'issue de l'apprentissage. [24]

III.3.8.1 Détermination des entrées/sorties du réseau de neurones :

Pour toute conception de modèle, la sélection des entrées doit prendre en compte deux points essentiels :

- ❖ Premièrement, la dimension intrinsèque du vecteur des entrées doit être aussi petite que possible, en d'autre terme, la représentation des entrées doit être la plus compacte

possible, tout en conservant pour l'essentiel la même quantité d'information, et en gardant à l'esprit que les différentes entrées doivent être indépendantes.

- ❖ En second lieu, toutes les informations présentées dans les entrées doivent être pertinentes pour la grandeur que l'on cherche à modéliser : elles doivent donc avoir une influence réelle sur la valeur de la sortie. [24]

III.3.8.2. Choix et préparation des échantillons :

Le processus d'élaboration d'un réseau de neurones commence toujours par le choix et la préparation des échantillons de données. La façon dont se présente l'échantillon conditionne le type de réseau, le nombre de cellules d'entrée, le nombre de cellules de sortie et la façon dont il faudra mener l'apprentissage, les tests et la validation. Il faut donc déterminer les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.

Lorsque le modèle possède de nombreuses entrées, il n'est pas possible de réaliser un « pavage » régulier dans tout le domaine de variation des entrées, alors il faut trouver une méthode permettant de réaliser uniquement des expériences qui apportent une information significative pour l'apprentissage du modèle.

Afin de développer une application à base de réseaux de neurones, il est nécessaire de disposer de deux bases de données, une pour effectuer l'apprentissage et l'autre pour tester le réseau obtenu et déterminer ses performances. [24]

III.3.8.3. Elaboration de la structure du réseau :

La structure du réseau dépend du type des échantillons. Il faut d'abord choisir le type de réseau : un perceptron standard, un réseau de Hopfield, un réseau à décalage temporel (TDNN), un réseau de Kohonen, un ARTMAP etc. Par exemple, dans le cas du perceptron multicouches, il faudra aussi bien choisir le nombre de couches cachées que le nombre de neurones dans cette couche. [24]

a. Nombre de couches cachées :

Sans couche cachée, le réseau n'offre que de faibles possibilités d'adaptation. Néanmoins, il a été démontré qu'un Perceptron Multicouches avec une seule couche cachée pourvue d'un nombre suffisant de neurones, peut approximer n'importe quelle fonction avec la précision souhaitée. Alors il faut décider du nombre de couches intermédiaires ou cachées. [24]

b. Nombre de neurones cachés :

Chaque neurone peut prendre en compte des profils spécifiques de neurones d'entrée.

Un nombre plus important permet donc de mieux coller aux données présentées mais diminue la capacité de généralisation du réseau. Il faut alors trouver le nombre suffisant de neurones cachés nécessaire pour obtenir une approximation satisfaisante.

Il n'existe pas, à ce jour, de résultat théorique permettant de prévoir le nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une performance spécifique du modèle, compte tenu des modèles disponibles. Il faut donc nécessairement mettre en œuvre une procédure numérique de conception de modèle. [24]

III.3.8.4 La réalisation de l'apprentissage :

Pour rendre l'optimisation plus performante, on peut utiliser des méthodes de second ordre. Le calcul est très efficace, mais lourd. Elles ont de nombreuses limitations, quant aux conditions de convergence, sur les dérivées secondes. Des corrections sont proposées pour éviter ce problème, et sont prises en compte par les méthodes dites de Quasi-Newton ou de Newton modifiée. [24]

III.3.8.5 Validation et Tests :

Alors que les tests concernent la vérification des performances d'un réseau de neurones hors échantillon et sa capacité de généralisation, la validation est parfois utilisée lors de l'apprentissage. Une fois le réseau de neurones développé, des tests s'imposent afin de vérifier la qualité des prévisions du modèle neuronal.

Cette dernière étape doit permettre d'estimer la qualité du réseau obtenu en lui présentant des exemples qui ne font pas partie de l'ensemble d'apprentissage. Une validation rigoureuse du modèle développé se traduit par une proportion importante de prédictions exactes sur l'ensemble de la validation.

Si les performances du réseau ne sont pas satisfaisantes, il faudra, soit modifier l'architecture du réseau, soit modifier la base d'apprentissage. [24]

La figure suivante figure III.23 représente un organigramme de conception d'un réseau de neurone

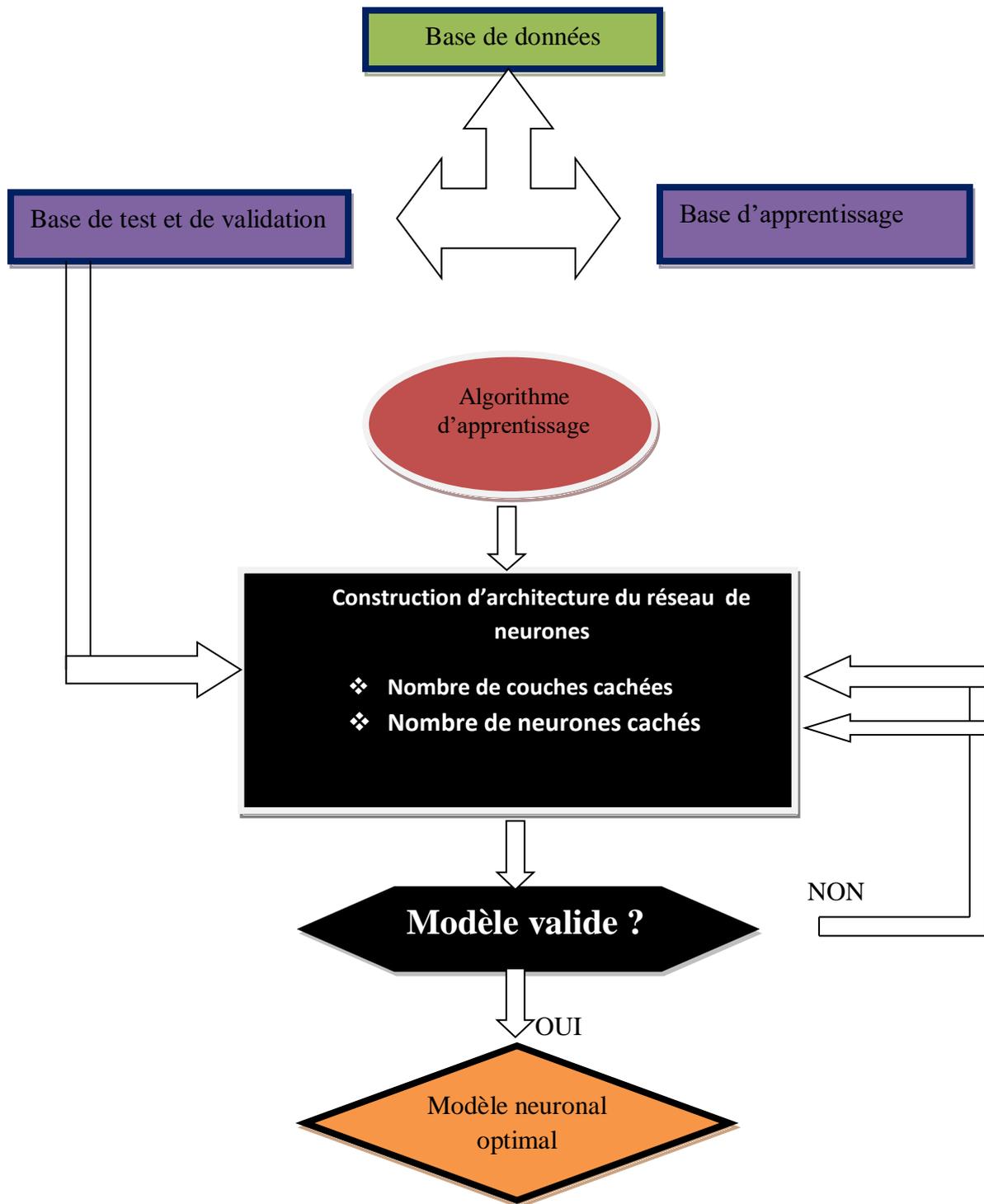


Figure III.23 : Organigramme de conception d'un réseau de neurones.[24]

III.3.9. Comportement du neurone artificiel :

On distingue deux phases. La première est habituellement le calcul de la somme pondérée des entrées (a) selon l'expression suivante

$$a = \sum (w_i \cdot e_i) \dots\dots\dots \text{(III.6)}$$

Avec : w : poids

e : Entrée

À partir de cette valeur, une fonction de transfert calcule la valeur de l'état du neurone. C'est cette valeur qui sera transmise aux neurones en aval. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. Les plus courantes sont présentées sur la figure III.31. On remarquera qu'à la différence des neurones biologiques dont l'état est binaire, la plupart des fonctions de transfert sont continues, offrant une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle [0, +1] (ou [-1, +1]).

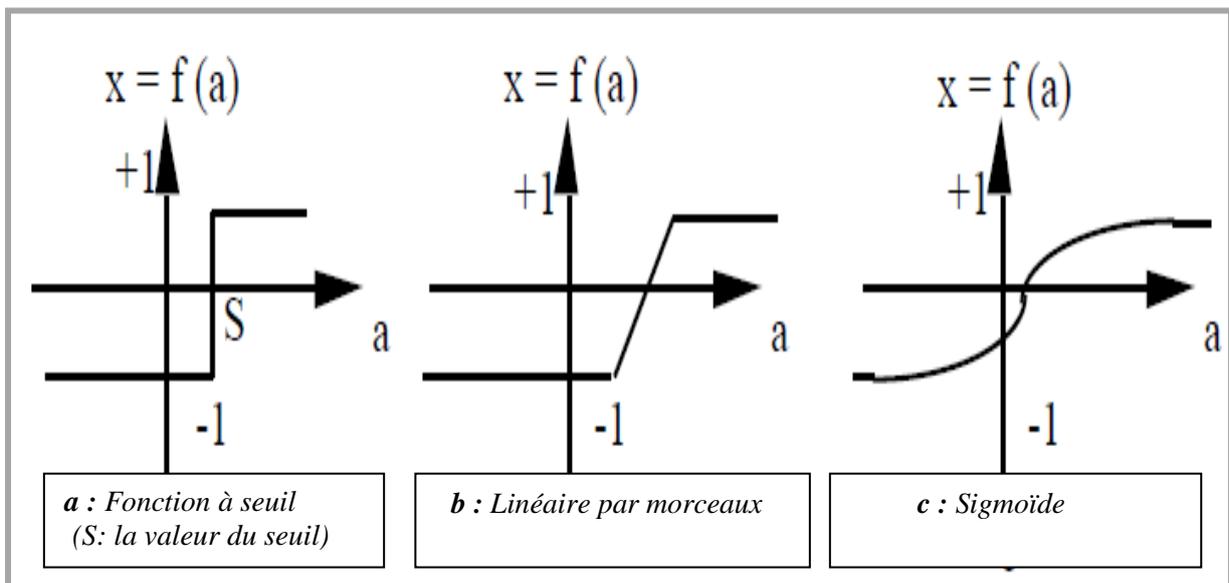


Figure III.24 : Différents types de fonctions de transfert pour le neurone artificiel. [25]

Nous constatons que les équations décrivant le comportement des neurones artificiels n'introduisent pas la notion de temps. En effet, et c'est le cas pour la plupart des modèles actuels de réseaux de neurones, nous avons affaire à des modèles à temps discret, synchrone, dont le comportement des composants ne varie pas dans le temps. [25]

III.3.10. Application des réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones servent dans aujourd'hui à toutes sortes d'applications dans divers domaines. On peut citer par exemples :

- Autopilotage des avions.
- Système de guidage des automobiles.
- Lecture automatique des chèques bancaires et d'adresses postales.
- Les réseaux de neurones sont utilisés aussi pour les systèmes de vision par ordinateur.
- Ils sont utilisés en robotique et en télécommunication.
- Ils sont aussi utilisés dans les domaines de finance.
- Ils sont utilisés pour le diagnostic médical.
- Production des systèmes de traitement signal et pour la synthèse de la parole. [7]

III.3.11. Avantages et inconvénients des réseaux de neurones :

III.3.11.1. Avantage des réseaux de neurones :

- Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe
- Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par rétro propagation des erreurs". L'apprentissage (ou construction du modèle) est automatique.
- Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données.
- Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en matis, informatique statistique requise.
- Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données.
- Pour l'utilisateur novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables. [7]

III.3.11.2. Inconvénients des réseaux de neurones :

- L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche(s) cachée(s).
- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence.
- Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation).
- La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boites noires où les connaissances Sont inintelligibles pour l'utilisateur. [7]

III.3.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le roulement et ses défauts. Ensuite, nous avons décrit le lien entre le pronostic et le diagnostic puis on s'est basé sur le pronostic, ses méthodes et approches.

La méthode la plus convenable pour un bon pronostic est l'intelligence artificielle telle que RNA. Cette dernière permet d'utiliser les données stockées pour surveiller le composant.

Le plus grand avantage du réseau de neurones c'est qu'utilisable dans différents domaines tels que la reconnaissance et le traitement des formes image, traitement de données...etc.

Chapitre IV :
Simulation MATLAB

IV.1. Introduction :

Les roulements font partie de la boîte de vitesses et sont responsables du couplage entre le rotor et le générateur, et sont utilisés dans les éoliennes en particulier sur les arbres à grande vitesse, qui sont soumis à des environnements difficiles pendant leur fonctionnement, y compris les vibrations et les chocs qui dépendent du vent la rapidité. Ces charges poussent les roulements à leurs limites, ce qui explique le taux de défaillance plus élevé que prévu ce qui entraîne souvent des coûts de réparation élevés et une perte de production en raison de temps d'arrêt longue.

Un modèle de dégradation exponentielle est nécessaire pour prédire la durée de vie utile restante (RUL) basée sur les vibrations pour la prédiction et la surveillance de l'état d'un roulement d'éolienne en temps réel à l'aide d'une approche basée sur les données d'aplatissement spectral (SK).

IV .2.Étude de cas :

L'ensemble de données est collecté à partir d'un arbre à grande vitesse d'éolienne de 2 MW entraîné par un pignon à 20 dents. Un signal vibratoire de 6 secondes a été acquis chaque jour pendant 50 jours consécutifs sauf le 17 mars où il y a 2 mesures, qui sont traitées comme deux jours dans cet exemple.

Un défaut de bague intérieure s'est développé et a provoqué la défaillance du roulement au cours de la période de 50 jours.

Dans cette section, nous présentons les performances du modèle généré et les résultats de prédiction sous forme de graphiques obtenus à partir des simulations MATLAB.

IV .3.Résultats et discussion :

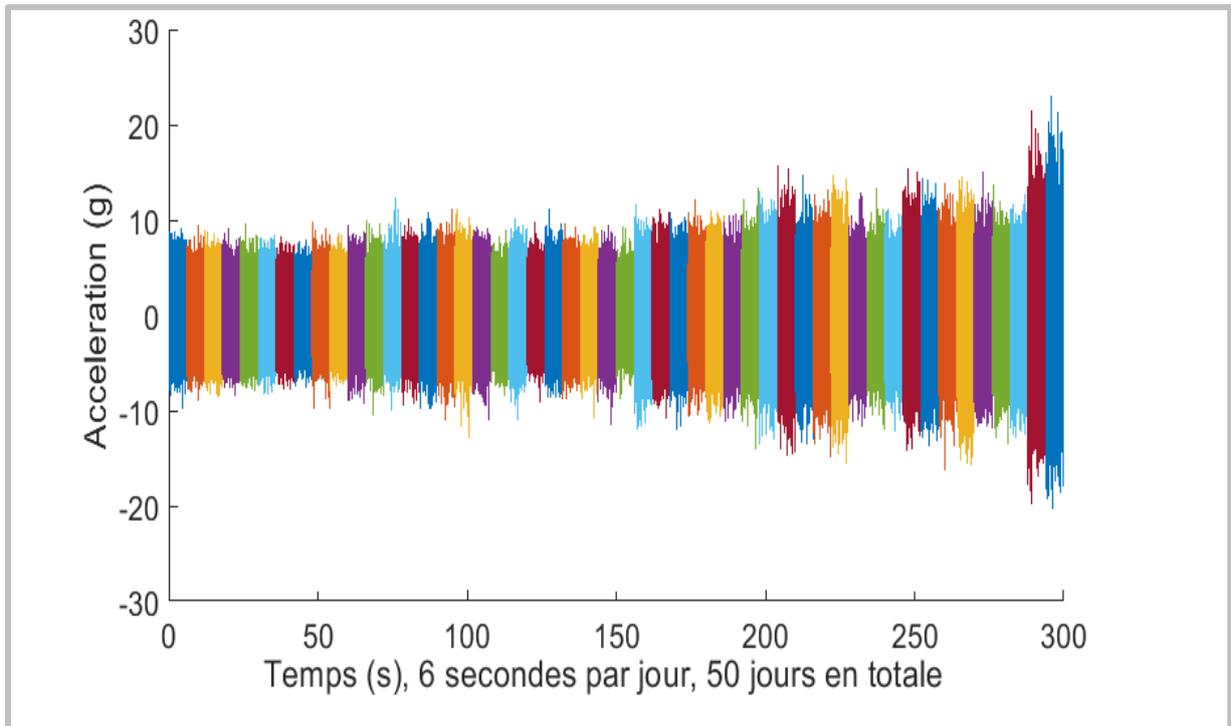


Figure IV.1 : signaux vibratoires dans le domaine temporel

Le graphique montre les mesures d'accélération (en g : gravitation de terre= 9.81m/s^2), comme on peut le constater, la seule dimension explicite qui varie en fonction du domaine temporel est l'amplitude de l'accélération.

Malgré la variation visible de l'accélération, le nombre de données enregistrées est égale à : $6 \times 97\ 656 = 585\ 936$ registres par jour), ajouté à la condition asynchrone de la mesure, rend impossible l'utilisation de réseaux neuronaux conventionnels pour classer l'état des roulements. Le problème nécessite une approche différente pour transformer une variable sinusoïdale dans le domaine temporel en une variable non cyclique dans le domaine fréquentiel, permettant de distinguer les classes de RUL qui est le kurtoise.

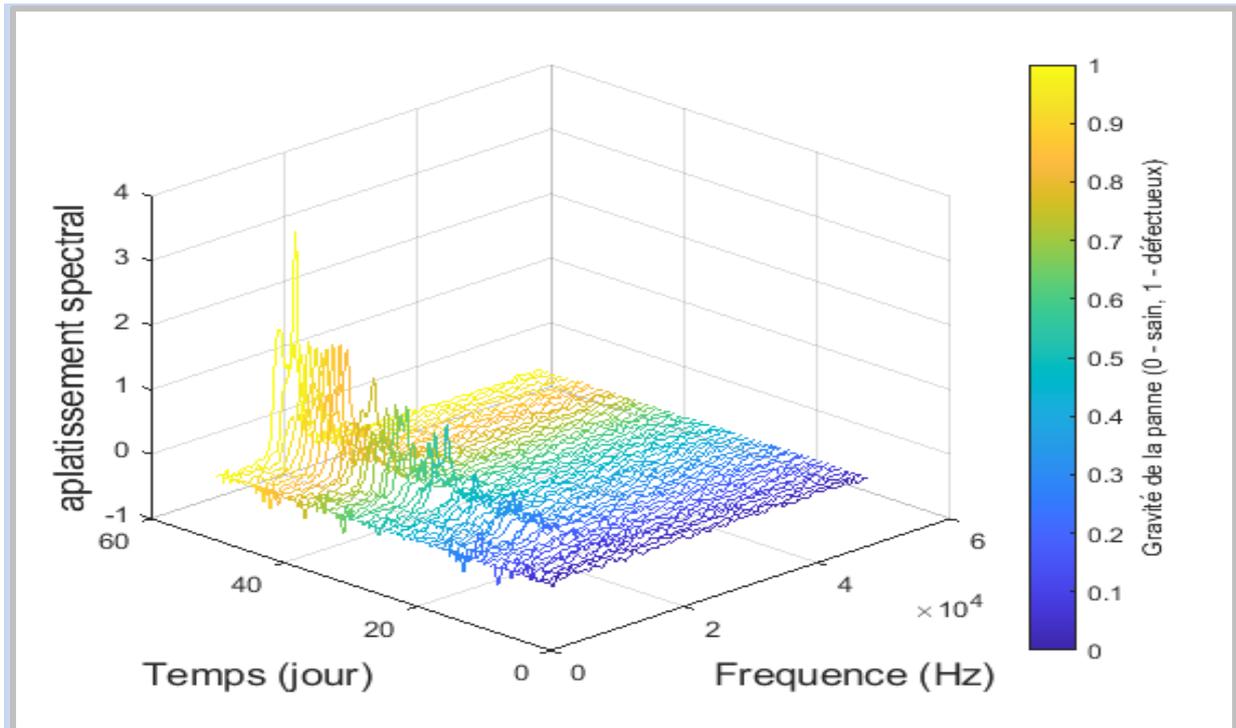


Figure IV.2 : aplatissement spectral

Le graphe en 3D représente le spectre kurtoise (variable z), les étiquettes associées aux deux classes de RUL sont définies par la variable y : classe d'espérance de vie moyenne ($y = 0$) pour les 35 premiers échantillons, et classe d'espérance de vie courte ($y = 1$) pour les 15 derniers échantillons. Aussi on observe que la valeur de spectre kurtoise autour de 10 kHz augmente progressivement au fur et à mesure que l'état de roulement se dégrade.

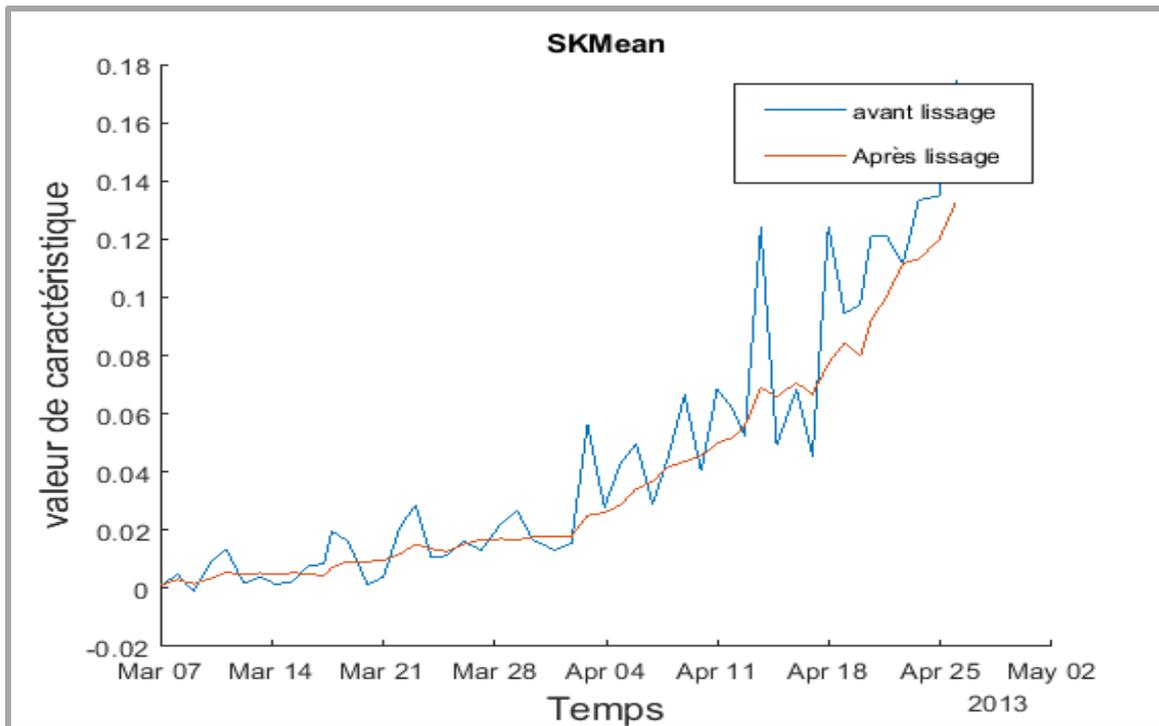


Figure IV.3 : graphe de fonction avant et après le lissage.

La figure présente la variation du SKMean par rapport au temps avant et après le lissage.

D'après la figure on constate que le bruit du signal est plus élevé avant le lissage (trait bleu) en le comparant avec celui après le lissage (trait rouge).

Ce retard du signal qu'est due au bruit est atténué en sélectionnant le seuil approprié dans la prédiction RUL.

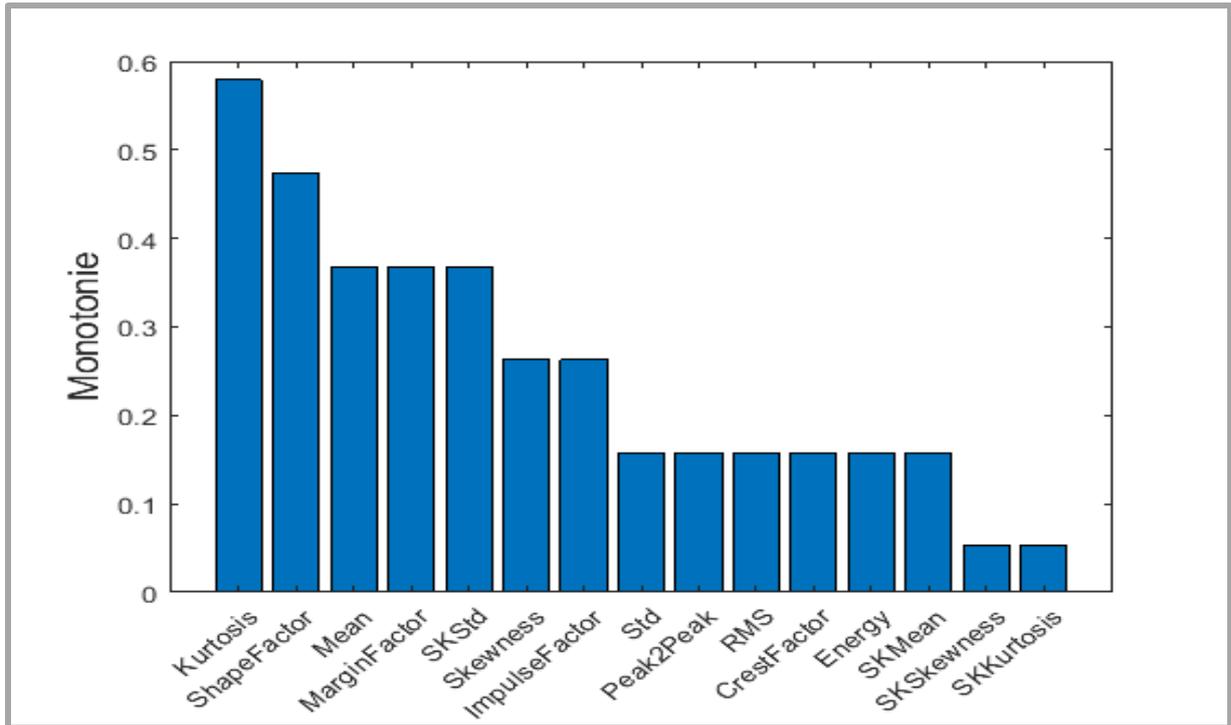


Figure IV.4 : graphe de la Monotonie

On observe que le kurtoise (kurtosis) à une bonne monotonie contrairement au SKSkewness et SKKurtosis sont pauvre.

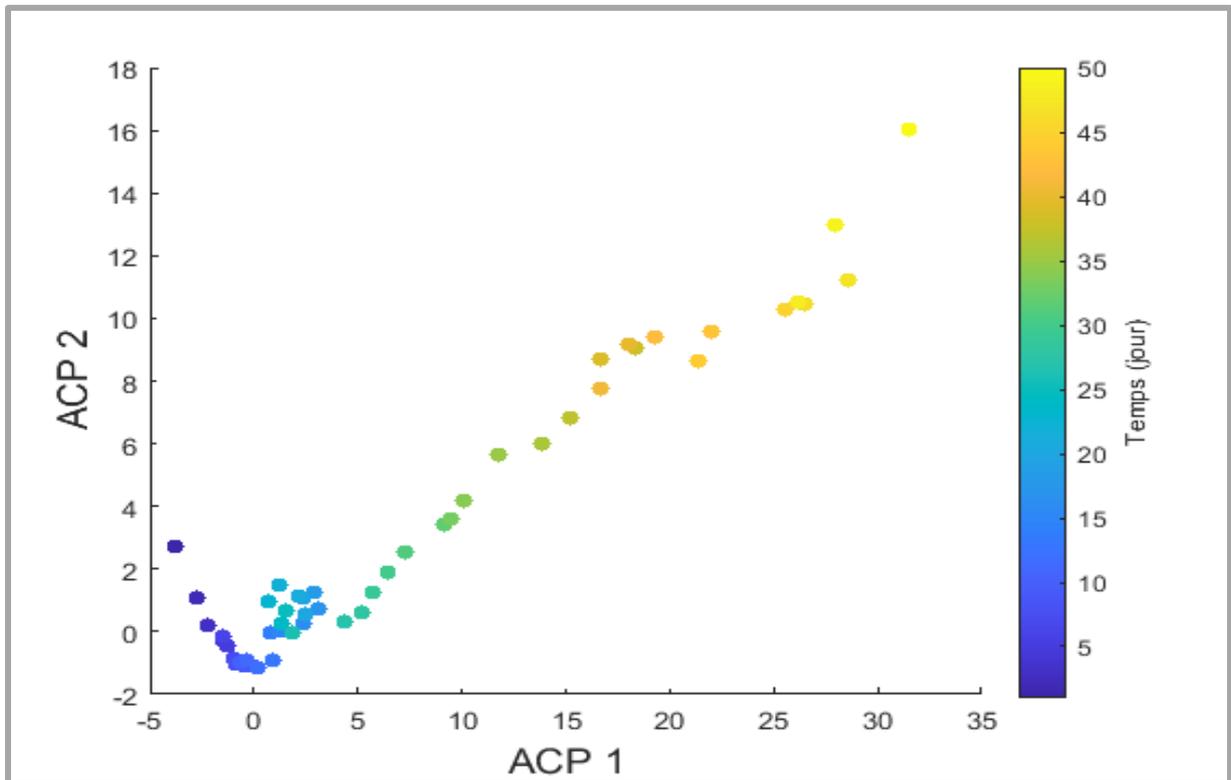


Figure IV.5 : graphique d'analyse en composantes principales

Le graphique indique que la première composante principale augmente à mesure que le roulement s'approche de la panne.

Alors, la première composante principale est un indicateur de santé fusionné prometteur illustré dans la Figure IV.6

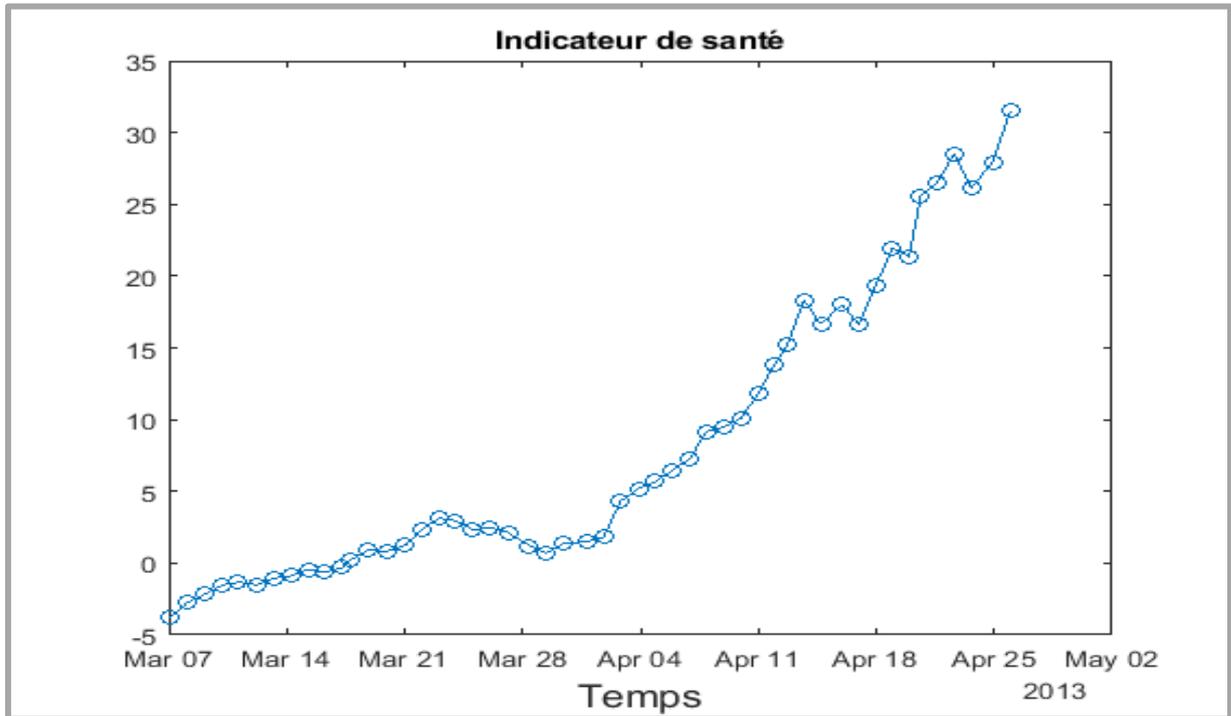


Figure IV.6 : Indicateur de santé

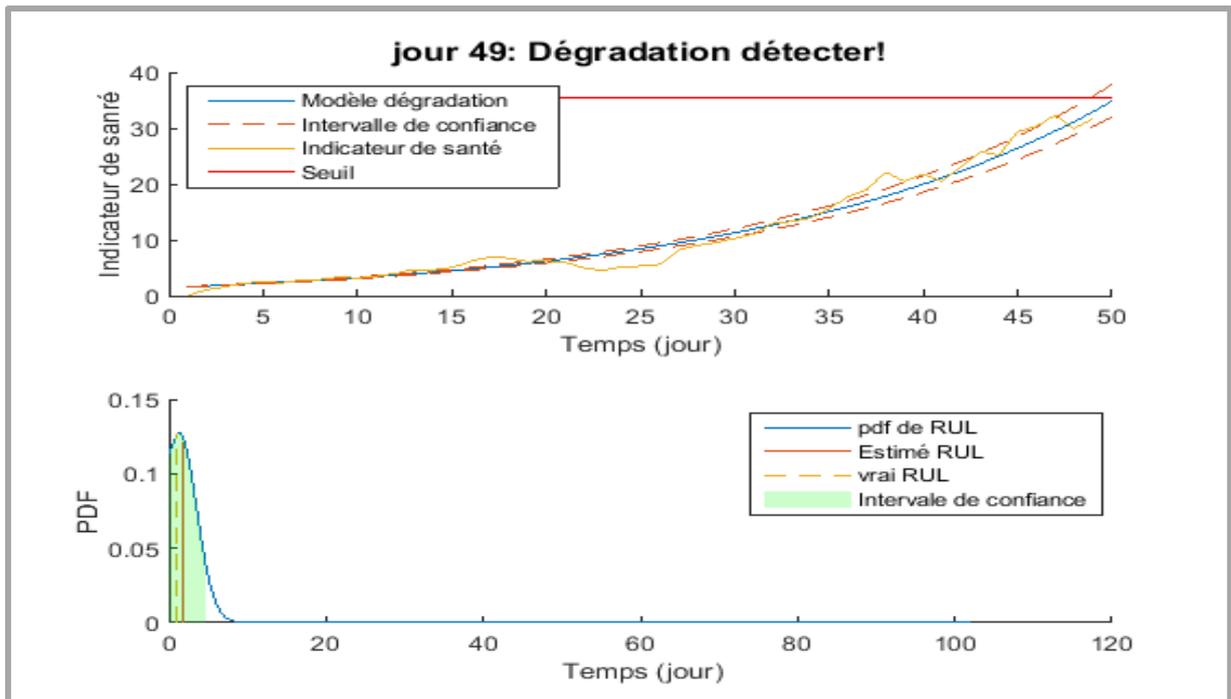


Figure IV.7 : graphe de dégradation détecter

La figure précédente présente l'animation de l'estimation RUL en temps réel pendant une durée de 49 jours.

On remarque que la dégradation a été détectée entre 3^{ème} et 49^{ème} jour et varie en fonction du temps. Alors que pendant les 3 premiers jours elle n'a pas été détectée car l'indicateur de santé est nul.

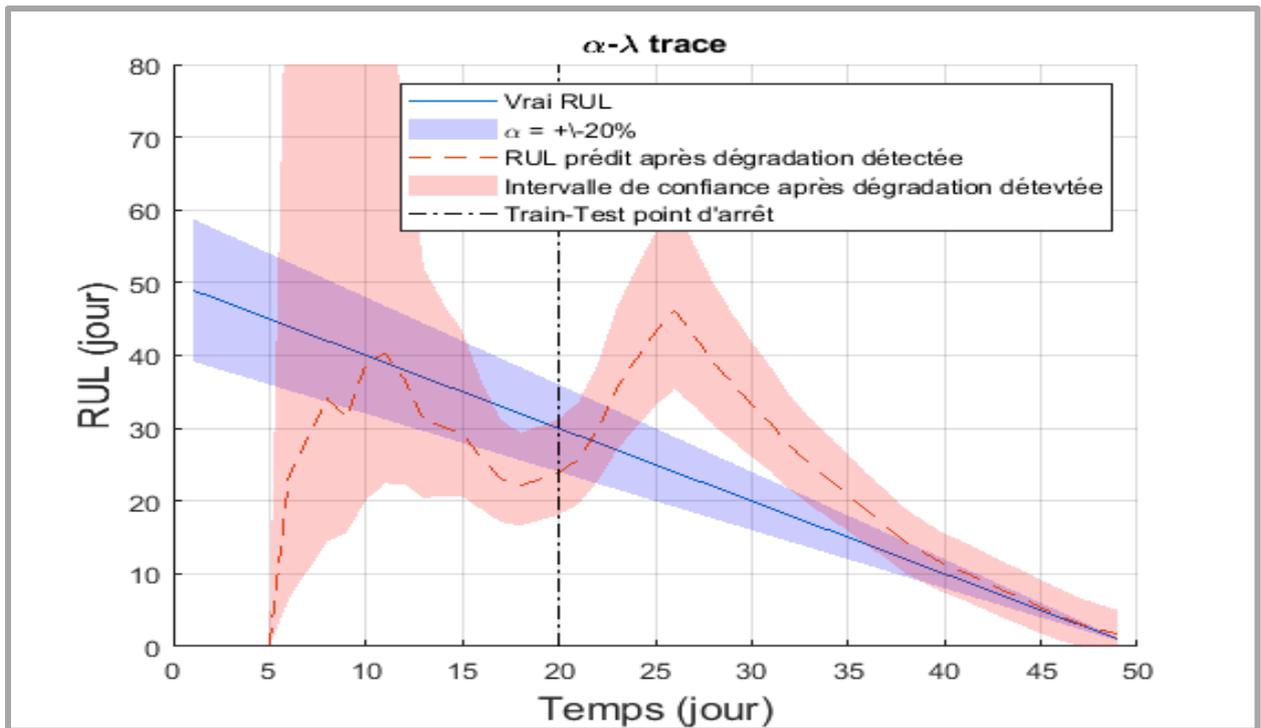


Figure IV.8 : Analyse de performance

La figure précédente montre l'analyse des performances pronostiques ; c'est la variation du RUL en fonction du temps. On a réduit α à 20% puis on déduit la probabilité pour que RUL estimée soit située entre la limite du vrai RUL (20%)

D'après le graphe, RUL estimé ne reflète pas le RUL vrai, alors le modèle à besoin s'ajouter quelque pas de temps pour s'adapter à une distribution de paramètre appropriée.

La prédiction devient plus précise à mesure que davantage de points de données sont disponibles comme le montre la figure IV.9 suivante :

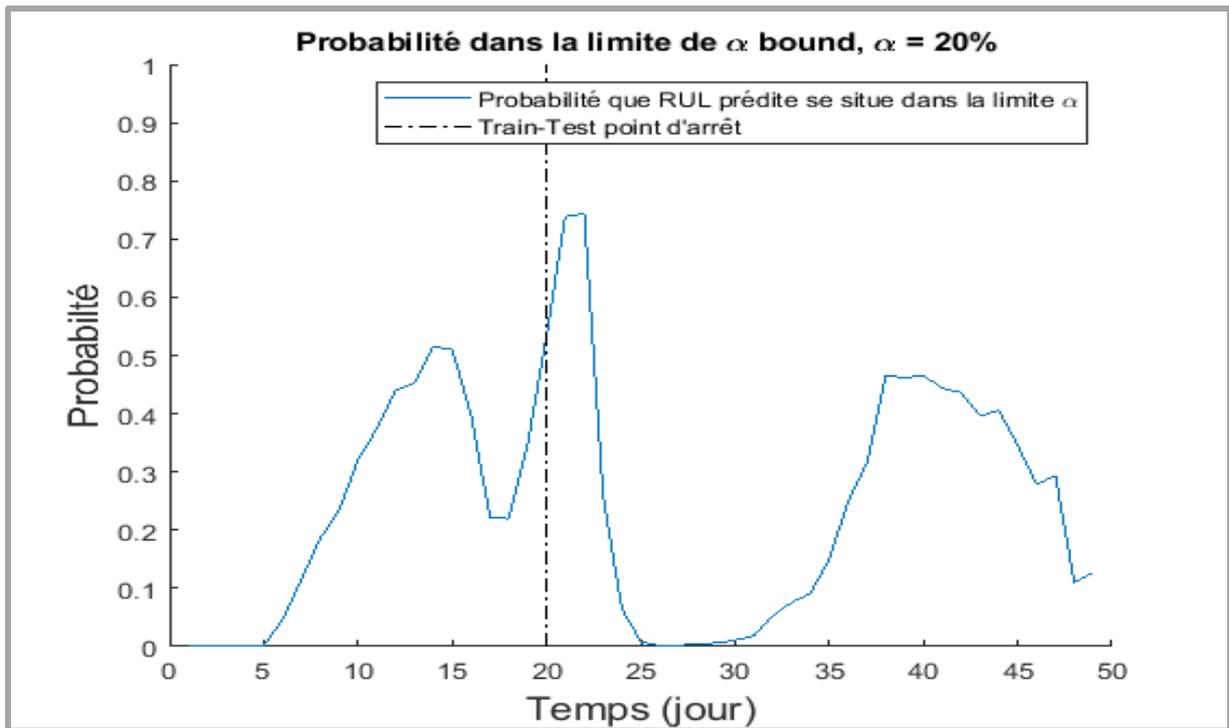


Figure IV.9 : Probabilité dans la limite

IV.4. conclusion :

D'après ce chapitre, on conclut qu'il existe différents états de dégradation du roulement au fil du temps.

On constate aussi, que la simulation MATLAB réalisée permet de détecter la dégradation de roulement pendant une durée du temps donnée en effectuant une étude sur une base des données importées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire apporte une contribution au domaine des énergies renouvelables et plus précisément, l'énergie éolienne pour mieux connaître les éoliennes qui participent à la production de l'énergie électrique dans le monde. L'étude a été réalisée dans le but de détecter, prédire et prévenir un bris quelconque lié à une composante principale d'une éolienne qui est le roulement de la boîte de vitesse, cette composante présente l'élément le plus critique dans le système des éoliennes.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres, dans le premier chapitre on a parlé premièrement sur les modes de production électrique et les énergies renouvelables, puis on a présenté les éoliennes en générale, l'historique, leurs composants, leur fonctionnement et constitution. Nous avons aussi défini les paramètres qui sont utilisés pour leur classification, notamment, le coefficient de puissance, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients, Aussi on a cité le développement de cette énergie en Algérie et leur classement mondial .Enfin, on a parlé sur le vent qu'est indispensable pour le fonctionnement des éoliennes.

Dans le contexte de deuxième chapitre on a parlé premièrement sur la maintenance et ses différents niveaux, types et objectifs.

La deuxième partie est consacrée pour la maintenance des éoliennes, et comment choisir un type de maintenance d'une éolienne après l'identification de ces composants les plus critiques Et on conclut que la maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire est la plus approprié.

Ensuite dans le troisième chapitre on a parlé de différents types des roulements, ensuite on a abordé les méthodes de pronostic et de diagnostic, leurs avantages et inconvénients.

Au cours de notre travail nous avons choisi d'étudier le pronostic des roulements avec la méthode RNA. Dans cette dernière nous avons défini le réseau de neurone artificiel ensuite nous avons montré son architecture, sa conception, application, comportement, avantages et inconvénients.

Cette étude nous a été très bénéfique pour l'enrichissement de nos connaissances et de mieux connaître les composants critiques des éoliennes, un pronostic des roulements a été développer avec les RNA mais reste important de savoir la durée de vie utile de cette dernière.

Conclusion générale

Pour cela dans le quatrième chapitre nous avons appliqué une simulation MATLAB qui nous a permis de mieux connaître une meilleure estimation RUL et donc prédire la dégradation du roulement à grande vitesse.

Tandis que les résultats de simulation étaient sous forme de figures chacune est suivie par une interprétation.

Ce projet de fin d'étude nous a donné l'opportunité de toucher à plusieurs disciplines notamment à la programmation sous MATLAB et surtout de faire des recherches scientifiques et des études rigoureuses.

Notre étude participe à l'amélioration de pronostic des défauts des éoliens et de mieux le développer avec les réseaux de neurone artificiels.

Annexe : résultats de simulation MATLAB

Annexe 1 :

```
Command Window

ans =

M×3 tall table

    Date          vibration          tach
    _____    _____    _____
07-Mar-2013 01:57:46 [585936×1 double] [2446×1 double]
08-Mar-2013 02:34:21 [585936×1 double] [2411×1 double]
09-Mar-2013 02:33:43 [585936×1 double] [2465×1 double]
10-Mar-2013 03:01:02 [585936×1 double] [2461×1 double]
11-Mar-2013 03:00:24 [585936×1 double] [2506×1 double]
12-Mar-2013 06:17:10 [585936×1 double] [2447×1 double]
13-Mar-2013 06:34:04 [585936×1 double] [2438×1 double]
14-Mar-2013 06:50:41 [585936×1 double] [2390×1 double]
      :
      :
      :

Evaluating tall expression using the Parallel Pool 'local':
- Pass 1 of 1: Completed in 7.6 sec
Evaluation completed in 7.7 sec

featureTable =
```

Annexe 2 :

```
Command Window

featureTable =

50×15 timetable

    Date          Mean          Std          Skewness          Kurtosis          Peak2Peak          RMS          CrestFact
    _____    _____    _____    _____    _____    _____    _____    _____
07-Mar-2013 01:57:46 0.34605  2.2705  0.0038699  2.9956  21.621  2.2967  4.9147
08-Mar-2013 02:34:21 0.24409  2.0621  0.0030103  3.0195  19.31  2.0765  4.9129
09-Mar-2013 02:33:43 0.21873  2.1036 -0.0010289  3.0224  21.474  2.1149  5.2143
10-Mar-2013 03:01:02 0.21372  2.0081  0.001477  3.0415  19.52  2.0194  5.286
11-Mar-2013 03:00:24 0.21518  2.0606  0.0010116  3.0445  21.217  2.0718  5.0058
12-Mar-2013 06:17:10 0.29335  2.0791 -0.008428  3.018  20.05  2.0997  4.7966
13-Mar-2013 06:34:04 0.21293  1.972  -0.0014294  3.0174  18.837  1.9834  4.8496
14-Mar-2013 06:50:41 0.24401  1.8114  0.0022161  3.0057  17.862  1.8278  4.8638
15-Mar-2013 06:50:03 0.20984  1.9973  0.001559  3.0711  21.12  2.0083  5.4323
16-Mar-2013 06:56:43 0.23318  1.9842 -0.0019594  3.0072  18.832  1.9979  5.0483
17-Mar-2013 06:56:04 0.21657  2.113  -0.0013711  3.1247  21.858  2.1241  5.4857
17-Mar-2013 18:47:56 0.19381  2.1335  -0.012744  3.0934  21.589  2.1423  4.7574
18-Mar-2013 18:47:15 0.21919  2.1284 -0.0002039  3.1647  24.051  2.1396  5.7883
20-Mar-2013 00:33:54 0.35865  2.2536  -0.002308  3.0817  22.633  2.2819  5.2771
21-Mar-2013 00:33:14 0.1908  2.1782 -0.00019286  3.1548  25.515  2.1865  6.0521
22-Mar-2013 00:39:50 0.20569  2.1861  0.0020375  3.2691  26.439  2.1958  6.1753
23-Mar-2013 00:39:11 0.20948  2.1983  0.00050881  3.3478  25.089  2.2083  5.5689
24-Mar-2013 00:45:49 0.34682  2.2094  0.0017032  3.1091  23.867  2.2364  5.3336
25-Mar-2013 00:45:12 0.19618  1.9278  0.0021405  3.0347  17.818  1.9377  4.6938
26-Mar-2013 01:41:50 0.25952  2.2285  -0.0010331  3.0921  23.712  2.2436  5.3651
27-Mar-2013 03:58:27 0.32029  1.9234  -0.0074691  3.138  19.938  1.9498  5.222
28-Mar-2013 09:55:31 0.28083  2.2425  0.0015663  3.1312  21.836  2.26  5.1237
29-Mar-2013 09:55:05 0.20338  2.0688  0.0060922  3.1086  21.654  2.0788  5.7539
30-Mar-2013 10:01:42 0.19746  2.0251  0.0027601  3.1614  21.815  2.0347  5.4267
31-Mar-2013 19:38:18 0.25054  2.1342  -0.0027389  3.1059  22.556  2.1488  5.1739
01-Apr-2013 19:37:39 0.17031  1.8823  0.0021902  3.0453  19.508  1.89  5.3445
```

Date	Mean	Kurtosis	ShapeFactor	MarginFactor	SKStd		
02-Apr-2013 19:44:15	0.20036	2.1395	-0.0098318	3.7165	29.344	2.1489	6.8318
03-Apr-2013 21:29:42	0.25847	2.3347	0.00051575	3.3472	25.377	2.3489	5.5276
04-Apr-2013 21:29:01	0.20376	2.1987	0.00095205	3.2788	23.418	2.2081	5.1927
05-Apr-2013 21:35:37	0.21191	2.2473	0.0089109	3.3575	25.088	2.2572	5.7678
06-Apr-2013 22:12:09	0.26166	2.4184	-3.963e-05	3.3697	26.564	2.4325	5.4079
07-Apr-2013 22:11:31	0.16969	2.0936	-0.0025065	3.5427	26.676	2.1004	6.4158
08-Apr-2013 22:18:09	0.17779	2.1649	-0.0025598	3.7437	28.175	2.1722	6.5278
09-Apr-2013 23:14:45	0.30248	2.494	-0.0035764	3.567	30.548	2.5123	6.0012
10-Apr-2013 23:14:07	0.33233	2.6027	0.0029661	3.93	33.833	2.6238	6.633
11-Apr-2013 23:13:58	0.16521	2.34	0.0023102	3.9333	34.246	2.3458	7.4872
12-Apr-2013 17:02:31	0.29956	2.6734	-0.0049583	3.7307	35.601	2.6902	6.4903
13-Apr-2013 17:02:10	0.19032	2.5424	0.0064064	4.6527	34.055	2.5495	6.6946
14-Apr-2013 17:08:47	0.17747	2.3342	-0.0011711	3.4126	26.04	2.3409	5.4824
15-Apr-2013 22:55:24	0.35258	2.0737	-0.0071881	3.869	26.447	2.1034	6.3161
16-Apr-2013 23:01:59	0.19823	2.2178	-0.00093494	3.3969	24.39	2.2266	5.4035
17-Apr-2013 23:01:20	0.18767	2.3588	-0.0014158	4.83	36.814	2.3663	7.5655
18-Apr-2013 23:08:03	0.16037	2.2877	0.00042258	4.3782	31.163	2.2933	6.9983
19-Apr-2013 23:07:47	0.14406	2.2622	0.0021033	4.2974	31.792	2.2668	6.867
20-Apr-2013 15:13:07	0.16082	2.3875	-0.0095115	4.6366	33.622	2.3929	7.0567
21-Apr-2013 15:12:31	0.19152	2.4736	0.0018583	4.0259	30.735	2.481	6.1011
22-Apr-2013 15:19:08	0.159	2.2751	-0.00035525	3.8543	29.412	2.2807	5.9697
23-Apr-2013 15:18:30	0.17302	2.4506	-0.0053264	3.9453	30.213	2.4567	5.8969
24-Apr-2013 21:55:14	0.26902	3.1751	-0.0048896	5.0936	43.385	3.1865	6.8181
25-Apr-2013 23:22:02	0.25844	2.965	0.029554	5.5566	44.381	2.9762	7.7175

Annexe3 :

Date	Mean	Kurtosis	ShapeFactor	MarginFactor	SKStd
07-Mar-2013 01:57:46	0.34605	2.9956	1.2535	3.3625	0.025674
08-Mar-2013 02:34:21	0.29507	3.0075	1.254	3.5428	0.023281
09-Mar-2013 02:33:43	0.26962	3.0125	1.254	3.6541	0.023089
10-Mar-2013 03:01:02	0.25565	3.0197	1.2544	3.7722	0.025931
11-Mar-2013 03:00:24	0.24756	3.0247	1.2546	3.7793	0.027183
12-Mar-2013 06:17:10	0.25519	3.0236	1.2544	3.7479	0.027374
13-Mar-2013 06:34:04	0.233	3.0272	1.2545	3.8282	0.027977
14-Mar-2013 06:50:41	0.23299	3.0249	1.2544	3.9047	0.02824
15-Mar-2013 06:50:03	0.2315	3.033	1.2548	3.9706	0.032417
16-Mar-2013 06:56:43	0.23475	3.0273	1.2546	3.9451	0.031744
17-Mar-2013 06:56:04	0.23498	3.0407	1.2551	3.9924	0.032691
17-Mar-2013 18:47:56	0.21839	3.0533	1.2557	3.9792	0.037226
18-Mar-2013 18:47:15	0.21943	3.0778	1.2567	4.0538	0.043097
20-Mar-2013 00:33:54	0.23854	3.0905	1.2573	3.9658	0.047942
21-Mar-2013 00:33:14	0.23537	3.1044	1.2578	3.9862	0.051023
22-Mar-2013 00:39:50	0.23079	3.1481	1.2593	4.072	0.058908
23-Mar-2013 00:39:11	0.2296	3.1853	1.2607	4.0645	0.068126
24-Mar-2013 00:45:49	0.25511	3.1879	1.2608	4.1083	0.065787
25-Mar-2013 00:45:12	0.25127	3.1662	1.2601	4.0291	0.060565
26-Mar-2013 01:41:50	0.23475	3.1679	1.2601	4.0501	0.057547
27-Mar-2013 03:58:27	0.25633	3.1651	1.26	4.0256	0.056356
28-Mar-2013 09:55:31	0.26885	3.1422	1.2594	3.8771	0.051618
29-Mar-2013 09:55:05	0.26784	3.1023	1.2579	3.9324	0.049141
30-Mar-2013 10:01:42	0.24294	3.111	1.2583	4.0097	0.051678
31-Mar-2013 19:38:18	0.25201	3.1229	1.2588	4.0088	0.053604
01-Apr-2013 19:37:39	0.23714	3.1151	1.2584	4.121	0.054226

Command Window						
02-Apr-2013 19:44:15	0.21715	3.2115	1.2614	4.2776	0.07526	
03-Apr-2013 21:29:42	0.21342	3.2475	1.2629	4.3093	0.082219	
04-Apr-2013 21:29:01	0.21348	3.2759	1.2641	4.2066	0.091262	
05-Apr-2013 21:35:37	0.21589	3.3085	1.2655	4.1859	0.10316	
06-Apr-2013 22:12:09	0.21775	3.3525	1.2673	4.1475	0.11091	
07-Apr-2013 22:11:31	0.21764	3.4354	1.2702	4.2294	0.12772	
08-Apr-2013 22:18:09	0.21388	3.4399	1.2705	4.1845	0.13668	
09-Apr-2013 23:14:45	0.22122	3.4766	1.2719	4.2022	0.14095	
10-Apr-2013 23:14:07	0.24264	3.5851	1.2752	4.2709	0.15192	
11-Apr-2013 23:13:58	0.23486	3.6811	1.2778	4.4631	0.16343	
12-Apr-2013 17:02:31	0.24118	3.7413	1.2803	4.5289	0.17389	
13-Apr-2013 17:02:10	0.24461	3.9263	1.2862	4.4537	0.20082	
14-Apr-2013 17:08:47	0.24456	3.8711	1.2849	4.2649	0.18271	
15-Apr-2013 22:55:24	0.25291	3.9214	1.2862	4.4416	0.19599	
16-Apr-2013 23:01:59	0.23056	3.8325	1.2836	4.3977	0.18461	
17-Apr-2013 23:01:20	0.2343	3.982	1.2877	4.4334	0.20885	
18-Apr-2013 23:08:03	0.2111	4.0899	1.2899	4.6256	0.23255	
19-Apr-2013 23:07:47	0.2034	4.0307	1.2872	4.7202	0.23393	
20-Apr-2013 15:13:07	0.20062	4.2347	1.2925	4.9592	0.26985	
21-Apr-2013 15:12:31	0.17378	4.2608	1.2945	4.8226	0.28323	
22-Apr-2013 15:19:08	0.16724	4.3371	1.2969	4.8897	0.30781	
23-Apr-2013 15:18:30	0.1648	4.1896	1.294	4.644	0.3003	
24-Apr-2013 21:55:14	0.18291	4.3089	1.3012	4.429	0.30959	
25-Apr-2013 23:22:02	0.20197	4.5187	1.3079	4.3528	0.34666	

fx >> |
< >

Bibliographie :

- [1] ATOUI Issam, « CONTRIBUTION AU DIAGNOSTIC DE DEFAUT DANS UNE CHAÎNE DE PRODUCTION D'ÉNERGIE » , UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA , 2009.
- [2] BENKADDOUR oussama abdelbari ,CHERADID aymen, «Conception, calcul et simulation d'une éolienne de faible puissance» , Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued ,2019/2020.
- [3] TRAORE Massitan , «GESTION DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE D'UNE ALIMENTATION PRIVEE CONNECTE AU RESEAU», UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA , 2017.
- [4] Kerikeb Mohamed , « Modélisation, Simulation et Commande d'une Eolienne Contrarotative » , UNINERSITE DU 20 AOUT 1955 SKIKDA , 2011/2012.
- [5] DAHBI Abdeldjalil, « contribution à la commande et l'amélioration des performances de l'énergie électrique d'une chaîne de production éolienne», Université Mostafa BENBOULAIID ,BATNA2, 27/06/2018
- [6] Bakkar Zakaria , «Détection de défauts d'une éolienne», UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA ,2018.
- [7] Habiboullah Beha Dine, Ladjedel Billal , «Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de la vitesse de vent», UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA.
- [8] Frédéric Poitiers, «ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone à cage autonome – Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Energie électrique». Université de Nantes, 2003.
- [9] Mohamed SOUSSAN & Tarik DIB , «Ecole Nationale de l'Industrie Minérale (E.N.I.M.) Etude critique et propositions d'amélioration de la gestion de la maintenance - cas de l'adduction EL KANSERA», 2011/2012
- [10] BOUZIANE LAKHDAR MEDJAHED ALI, «Etude et amélioration des paramètres de la sûreté de fonctionnement d'un système électromécanique», UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ,2019/2020.
- [11] Jean-Pierre VERNIER, Consultant en maintenance, livre 1000questions-réponses pour la maintenance

[12] MAHFOUD BRAHIM, « ANALYSE DE LA FONCTION MAINTENANCE A L'UNITE TSS – SIDER ANNABA», UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016/2017.

[13] Jérémy Llaurens, « Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique». Sciences pharmaceutiques. 2011.

[14] HAYOUNI JIHED, « DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE PRONOSTIC POUR LES ROULEMENTS DES ÉOLIENNES», UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI, octobre 2017.

[15] Kious Mohammed Moncef, Bousbia Salah Ammar, « Maintenance conditionnelle par analyse vibratoire dans une centrale Électrique à turbine à gaz», Univrsité Kasdi Merbah Ouargla ,2019/2020.

[16] BENLALLI YACINE, « ETUDE DU PROCESSUS DE DEGRADATION DES ROULEMENTS PAR ANALYSE VIBRATOIRE», UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2003/2004.

[17] NEOUIDJEM El yazid ,KERROUCHE Abderahmane , « Diagnostic et classification des défauts de roulement dans une éolienne, en utilisant l'analyse vibratoire et les réseaux de neurones artificiels» , Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi ,14 Juillet 2021.

[18] Berretima Mohammed Walid, Analyse vibratoire pour la détection et la diagnostic des défauts de roulement en utilisant le kurtosis spectral», Université Mohamed Khider de Biskra, 6 juillet 2019.

[19] David Gucik-Derigny, «CONTRIBUTION AU PRONOSTIC DES SYSTÈMES NON LINÉAIRES À BASE DE MODÈLES : THÉORIE ET APPLICATION. Automatique » ,Université Paul Cézanne -Aix-Marseille III, 2011.

[20] Pauline Ribot. «Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes. Automatique / Robotique». Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009.

[21] CHELAGHEMA Mohamed Lamine, « Pronostic des défauts statoriques et rotoriques des machines asynchrones», Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2018-2019.

[22] DEBBAH Younes, « Développement d'un outil de pronostic pour la maintenance des systèmes mécaniques», UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI – CONSTANTINE, 2018.

[23] Claude Touzet. «LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS, INTRODUCTION AU CONNEXIONNISME : COURS, EXERCICES ET TRAVAUX PRATIQUES». EC2, 1992, Collection de l'EERIE, N. Giambiasi.

[24] Mohamed Yessin AMMAR, « MISE EN ŒUVRE DE RESEAUX DE NEURONES POUR LA MODELISATION DE CINETIQUES REACTIONNELLES EN VUE DE LA TRANSPOSITION BATCH/CONTINU», l'I.N.P. – Toulouse – 17 juillet 2007

[25] M. ZIANE Khaled, Analyse, « Évaluation et Réduction des Risques d'un Parc Éolien», Université d'Oran 2, 2 juillet 2017.

[33] Kious Mohammed Moncef ,Bousbia Salah Ammar, « Maintenance conditionnelle par analyse vibratoire dans une centrale Électrique à turbine à gaz», Univrsité Kasdi Merbah Ouargla,2019-2020.

[42] Critical Wind Turbine Components Prognostics: A Comprehensive Review, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 69, NO. 12, DECEMBER 2020 .

[43] ABDALLAH MOHAMMED, « Optimisation de la maintenance préventive des systèmes de production incorporant la dépendance par les meta-heuristique », UNIVERSITE DE DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES.

[44] Fanjason Jacques Ramahaleomiarantsoa. Diagnostic des systèmes à énergies renouvelables de type éolien. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Pascal Paoli; Ecole supérieure polytechnique d'Antsiranana (Madagascar), 2013. Français.

[45] Tahar BOUKRA, « Diagnostic et pronostic des défauts des Moteurs Asynchrones» , Université - 20 Août 1955 – Skikda, 11 Février 2016.

Webographie :

[26] <http://www.parcdesventsurbise.fr/le-projet/le-choix-du-site-2318.html>

[27] <https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/352953/puissance-eolienne>

[28] <https://journals.openedition.org/bmsap/4463>

[29] <https://www.juripredis.com/fr/blog/id-19-demystifier-le-machine-learning-partie-2-les-reseaux-de-neurones-artificiels>

[30] <https://www.ecologie.gouv.fr/energies-renouvelables>

[31] <https://expose-en-svt-classe-de-3eme-les-energies-fossiles-et-renouvelables-12173.html>

[32] <http://tpmattitude.fr/methodes.html>

[35] <https://www.manutan.fr/fr/maf/roulement-rigide-a-billes-contact-oblique-deux-rangees-serie-530>

[36] <https://www.usinenouvelle.com/expo/roulement-a-rouleaux-cylindriques-p1266914.html>

[37] <https://www.otelo.fr/roulement-aiguilles-hk2016/95008012/SF-ID-00160107/ref-35612.html>

[40] <https://www.juripredis.com/fr/blog/id-19-demystifier-le-machine-learning-partie-2-les-reseaux-de-neurones-artificiels>

[41] https://hal-amu.archives-ouvertes.fr/hal01338010/file/Les_reseaux_de_neurones_artificiels.pdf

[46] <https://www.societal.org/anticiper-les-defaillances-grace-a-la-methode-amdec/>