

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

**Option** : Technique de production industrielle

Présenté par :

**BOUDIAF Mohammed Aymen**

### Thème

**TECHNIQUE DE MAINTENANCE D'UNE INSTALLATION  
EOLIENNE**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Djerad Abdelkader	MCA	Président
ZERGANE Said	MCA	Encadreur
MOUSSAI Toufiq	MAA	Examineur

*Année Universitaire : 2021 / 2022*

N° d'ordre : GM/...../2022

# Remerciements

Nous remercions Dieu Tout- puissant, qui nous à aidés à mener à bien la recherche scientifique et qui nous a inspirés par la santé, le bien-être et la détermination.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre gratitude au professeur encadrant  
Dr "ZERGANE SAID"

Pour tous les conseils et précieuses information qu'il nous a fournis et qui ont contribué à compléter le sujet de notre étude dans ses différents aspects.

Nous adressons également nos sincères remerciements au chef du département mécanique "ROKBI MANSOUR".

Et n'oubliez pas de remercier les professeurs respectés pour tous vos efforts.

# Dédicace

À qui je le préfère à moi-même et pourquoi pas, elle  
s'est sacrifiée pour moi et n'a ménagé aucun effort  
pour me rendre heureux toujours

Ma "mère" bien-aimée.

Nous marchons sur les chemins de la vie, et  
celui qui contrôle nos esprits reste sur chaque  
chemin que nous prenons Le propriétaire d'un  
bon visage et de bonnes actions, il ne m'a pas  
épargné toute sa vie mon cher "père"

À mes frères, sœurs, amis et tous ceux qui m'ont  
soutenu et m'ont aidé avec tout ce qu'ils avaient et  
dans de nombreux aspects.

# Sommaire

## Introduction général

### *Chapitre I Généralités sur la maintenance industrielle*

INTRODUCTION .....	1
I.1. LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE .....	2
I.1.1. DEFINITION DE LA MAINTENANCE .....	2
I.1.2. TYPES DE MAINTENANCE.....	3
I.1.2.1. MAINTENANCE CORRECTIVE .....	3
I.1.2.1.1. MAINTENANCE CORRECTIVE CURATIVE .....	4
I.1.2.1.2. MAINTENANCE CORRECTIVE PALLIATIVE.....	4
I.1.2.2. LA MAINTENANCE PREVENTIVE .....	5
I.1.2.2.1. LA MAINTENANCE PREVENTIVE SYSTEMATIQUE .....	5
I.1.2.2.2. LA MAINTENANCE PREVENTIVE CONDITIONNELLE .....	5
I.2. LA COURBE EN BAIGNOIRE .....	5
I.3. ORGANISATION DU SERVICE MAINTENANCE .....	7
I.4. METHODES ET TECHNIQUES D'ORDONNANCEMENT .....	7
I.4.1. LA METHODE DE PERT .....	7
I.4.1.1. PRINCIPE DE LA METHODE.....	8
I.4.1.2. PRESENTATION LA METHODE .....	8
I.4.2. LA METHODES DE GANTT .....	13
I.4.2.1. LES BUTS DE LA METHODE DE GANTT .....	13
I.4.2.3. DATE SAU PLUS TOT ET AU PLUS TARD.....	14
I.4.2.5. EXEMPLE D'APPLICATION.....	15

### *Chapitre II installation éolienne*

INTRODUCTION .....	16
I.INSTALLATION D'UN PARC EOLIEN.....	17
II.1. NOTION DE PARC EOLIEN.....	17
II.1.2. CARACTERISTIQUES GENERALES D'UN PARC EOLIEN.....	17
II.2. ÉTAPES DE LA PLANIFICATION ET DE LA CONSTRUCTION D'UN PARC	

EOLIEN.....	18
II.3. DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION EOLIENNE.....	19
II.3.1. CRITERES DE CHOIX D'UN SITE EOLIEN.....	19
II.3.2. ANALYSE DE GISEMENT ENERGETIQUE DU VENT.....	20
II.3.2.2. APPAREILS POUR LA MESURE DU VENT.....	20
II.3.3. PUISSANCE D'UNE EOLIENNE.....	21
II.3.4. MESAUREMENT DE BRUIT.....	21
II.4. INSTALLATION DE LA MACHINE.....	22
II.4.1. CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE.....	22
II.4.2. MISE EN ŒUVRE DES FONDATIONS D'UNE EOLIENNE.....	24
II.4.3. MONTAGE DES EOLIENNES.....	26

### *Chapitre III Maintenance d'un parc éolien*

INTODUCTION.....	29
III.1. TECHNIQUE DE MAINTENANCE D'UN PARC EOLIEN.....	30
III.1.1. PROBLEMES LIES A L'ENERGIE EOLIENNE AUX MILIEUX FROIDS.....	30
III.1.1.1. REDUCTION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE.....	31
III.1.1.2. RISQUE DE CHUTE DE GLACE ET D'EMISSION SONORE.....	31
III.1.1.3. AUGMENTATION DE LA CHARGE DE FATIGUE.....	32
III.1.2. PROBLEMES LIES A L'ENERGIE EOLIENNE AUX MILIEUX DESERTIQUE.....	32
III.1.2.1. AUGMENTATION LA TEMPERATURE.....	32
III.2. PROBLEMES RENCONTRES DANS UN PARC EOLIEN.....	33
III.2.2. POUR LE MULTIPLICATEUR.....	33
III.2.3. GROUPE HYDRAULIQUE.....	33
III.3. L'EROSION.....	33
III.4. MAINTENANCE D'UN PARC EOLIEN.....	34
III.4.1.DEFINITION LA MAINTENANCE DU PARCEOLIEN.....	34
III.4.2. TYPE DE MAINTENANCE.....	34
III.4.2.1. MAINTENANCE PREVENTIVES.....	34
III.4.2.1.1. INSPECTION VISUELLE.....	35
III.4.2.1.2. GRAISSAGE D'ENTRETIEN.....	35
III.4.2.1.3. MAINTENANCE ELECTRIQUE.....	35
III.4.2.1.4. MAINTENANCE MECANIQUE.....	36

III.4.2.1.5. MAINTENANCE DES 300 HEURES .....	36
III.4.2.2. MAINTENANCE CORRECTIVE .....	37
III.4.2.3. MAINTENANCE PREDICTIVE .....	37
III.5. MAINTENANCE LES COMPOSANT D'EOLIEN .....	38
III.5.1.2. DESCRIPTION DES DYSFONCTIONNEMENTS ET DES CAUSES D'ENDOMMAGEMENT DES PALES .....	39
III.5.1.3. FLAMBAGE DYNAMIQUE (LOCAL) .....	40
III.5.1.4. FATIGUE DES PALES D'EOLIENNE .....	40
III.5.1.5. L'ENTRETIEN DE PALES .....	40
III.5.2. MAINTENANCE LA NACELLE .....	41
III.5.2.2. L'ENTRETIENDE LA NACELLE .....	42
□ le moyeu .....	42
□ arbre à vitesse lente .....	42
□ la boîte de vitesse .....	42
□ Les freins.....	43
□ L'arbre lent.....	43
□ Le générateur.....	43
III.5.3. MAINTENANCE LE MAT .....	43
III.5.3.2. L'ENTRETIENDE LE MAT .....	44
III.6. STRATEGIES D'OPTIMISATION DE L MAINTENANCE.....	44
III.6.1. GESTION DES PIECES DANS LE CADRE DE LA MAINTENANCE.....	44
III .7. MUTUALISATION DU TYPE DE MAINTENANCE ET STRATEGIES OPPORTUNISTES.....	45
III.8. COUTS DE LA MAINTENANCE .....	46
III.9.1. REDUIRE LES COUTS DE MAINTENANCE.....	47
III.9.1.1. IDENTIFIER LES COMPOSANTS CRITIQUES .....	47
III.9.1.2. CARACTERISER LES MODES DE DEFAILLANCE.....	47
III.9.1.3. IDENTIFICATIONS DES CAUSES PRINCIPALES .....	47
III.9.1.4. ÉLABORATION D'UN PLAN DE LOGISTIQUE .....	49
III.9.1.5. AMELIORER LA MAINTENABILITE .....	49
III.9.1.6. IMPLANTER DES SYSTEMES DE SURVEILLANCE.....	49
Conclusion générale.....	51
Références .....	51

## Liste des figures

Fig. I.1 Types de maintenance .....	03
Fig. I.2. Processus de déroulement d'une maintenance corrective d'un équipement .....	04
Fig. I.3. Courbe en baignoire.....	06
Fig. I.4. Structure du service maintenance.....	07
Fig. I.5 Présentation de diagramme de PERT.....	08
Fig. I.6 Règle 1 de diagramme de PERT.....	09
Fig. I.7 Règle 2 de diagramme de PERT.....	09
Fig. I.8 Règle 3 de diagramme de PERT.....	10
Fig. I.9 Méthodologie de réalisation d'un projet.....	10
Fig. I.10 Exemple de diagramme de PERT.....	11
Fig. I.11 Date au plus tôt d'une étape diagramme de PERT.....	11
Fig. I.12 Date au plus tard d'une étape de diagramme de PERT.....	12
Fig. I.13 La marge totale de diagramme de PERT.....	12
Fig. I.14 Le chemin critique de diagramme de PERT.....	12
Fig. I.19 Opérations à réaliser.....	14
Fig. I.16 Méthode de GANTT.....	14
Fig. I.17 Tâches et durée des tâches de la préparation d'un repas.....	15
Fig. II.1.Raccordement électrique des installations.....	18
Fig. II.2 Effet tunnel.....	20
Fig. II.3 Carte représentant le bruit autour d'une éolienne.....	22
Fig. II.4 Constituants d'une éolienne.....	22
Fig. II.5. Les étapes de fondation sur le sol.....	26
Fig. II.6. Préparation de la tour.....	27
Fig. II.6. Assemblage de la tour.....	27

<b>Fig. II.7 L'ensuite d'assemblage de la tour.....</b>	<b>28</b>
<b>Fig. III.1. Pales d'éoliennes givrées.....</b>	<b>31</b>
<b>Fig. III.2. Érosion du bord d'attaque.....</b>	<b>34</b>
<b>Fig. III.4. Phases de maintenance.....</b>	<b>35</b>
<b>Fig. III.5. Coupe transversale de l'intérieur d'une pale.....</b>	<b>39</b>

## Résumé

Notre sujet est lié aux techniques d'installation et de maintenance des éoliennes. En raison de la demande croissante d'énergie renouvelable, l'énergie éolienne a attiré l'attention de nombreuses équipes de recherche, car elle est devenue la ressource la plus importante pour la production d'électricité, la construction de ce système de production nécessite une sélection rigoureuse du site de plantation car les parcs éoliens sont coûteux. Projets qui doivent être gérés efficacement grâce à un processus d'installation approprié et à une maintenance industrielle appropriée. Que ce soit sur terre ou en mer, la défaillance d'un composant important, comme une boîte de vitesses, peut endommager d'autres composants, et il est donc important d'être averti à l'avance des problèmes potentiels et C'est ce qui rend la conception, la fabrication et l'installation d'éoliennes est un processus qui a besoin d'une étude technique professionnelle afin d'assurer le succès du projet et d'atteindre le taux de production le plus élevé à long terme.

## Abstract

Our topic is related to wind turbine installation and maintenance techniques. Due to the increasing demand for renewable energy, wind energy has attracted the attention of many research teams, as it has become the most important resource for electric power generation, the construction of this production system requires careful selection of planting site as wind farms are expensive projects that need To be managed efficiently through proper installation process and proper industrial maintenance. Whether on land or at sea, the failure of one important component, such as a gearbox, can damage other components, and therefore it is important to get advance warning of potential problems and This is what makes the design, manufacture and installation of wind turbines is a process that needs study technical consideration professional in order to ensure The success of the project and achieving the highest production rate in the long term.

## ملخص

يتعلق موضوعنا بتقنيات تركيب وصيانة توربينات الرياح. نظرًا للطلب المتزايد على الطاقة المتجددة ، فقد جذبت طاقة الرياح انتباه العديد من فرق البحث ، حيث أصبحت أهم مورد لتوليد الطاقة الكهربائية ، يتطلب إنشاء نظام الإنتاج هذا اختيارًا دقيقًا لموقع الزراعة حيث أن مزارع الرياح باهظة الثمن المشاريع التي تحتاج إلى إدارتها بكفاءة من خلال عملية التثبيت المناسبة والصيانة الصناعية المناسبة. سواء على الأرض أو في البحر ، يمكن أن يؤدي فشل أحد المكونات المهمة ، مثل علبة التروس ، إلى إتلاف المكونات الأخرى ، وبالتالي من المهم الحصول على تحذير مسبق من المشاكل المحتملة وهذا ما يجعل تصميم وتصنيع وتركيب توربينات الرياح هي عملية تحتاج إلى اعتبارات فنية احترافية من أجل ضمان نجاح المشروع وتحقيق أعلى معدل إنتاج على المدى الطويل.

## NOMONCLATURE

MTBF	Mean Time Between Failure
$N$	LE RENDEMENT
CI	Capital initial (\$)
PEE	prix de l'énergie éolienne (\$/kWh)
TCF	Taux de charge fixe (%/an)
$C_r$	Coûts de remplacements (\$/an)
PAE	production annuelle d'énergie (kWh/an)
CM	coûts de maintenance (\$/kWh)
$\beta$	Angle de calage
$\Omega$	<i>turbine</i> Vitesse de rotation du la turbine
$\Omega$	<i>mec</i> Vitesse de rotation de la génératrice
R	Rayon de la turbine
$C_g$	Couple mécanique coté génératrice
$C_{aer}$	Couple aérodynamique
$G$	Gain du multiplicateur de vitesse
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation de la génératrice
$N_f$	la rupture de l'échantillon
$\varepsilon_e, \varepsilon_p$ et $\varepsilon_t$	déformations élastiques
$pv$	La puissance du vent
$\rho$	Densité de l'air
$S$	Surface circulaire balayée par la turbine
V	Vitesse du vent
$P_{aer}$	Puissance aérodynamique
$C_p$	Le coefficient de puissance
$\lambda$	Ratio de la vitesse

## Introduction général

L'homme recherche toujours les nécessités de la vie dans l'exploitation de la nature pour son existence et sa survie, qui est un préalable, Il a beaucoup profité de certaines ressources naturelles en général grâce à la chaleur du soleil, de la terre, des vents, des chutes d'eau, des marées ou de la croissance des plantes, dont il s'occupe au quotidien parmi ces sources. Le vent, source d'énergie traditionnelle non polluante, est exploité depuis plusieurs siècles pour propulser des navires (il y a près de 3 000 ans), et alimenter, les moulins à vent (environ 200 000 moulins à vent en Europe vers le milieu du XIXe siècle), pomper de l'eau et des minéraux, et développer industrie. Ces derniers usages reposent tous sur la conversion de l'énergie éolienne captée par les ventilateurs en énergie mécanique utilisable, et ce seulement après le développement de l'électricité comme énergie moderne et les recherches successives sur les générateurs électriques construits par le danois Poul La Cour et pour la première fois en 1891 les éoliennes en produisant de l'électricité après avoir fabriqué les premières éoliennes, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie pendant la première et la seconde guerre mondiale à grande échelle.

C'est la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences à plus grande échelle qui ont forcé de nombreux pays à commencer à investir afin d'améliorer et de moderniser la technologie des éoliennes, ce qui a permis un développement significatif de l'industrie éolienne. Le coût total de l'énergie nécessaire pour produire de l'électricité à partir du vent est désormais compétitif par rapport à l'énergie conventionnelle. C'est dans ce cadre que notre projet vise à étudier les techniques de maintenance et d'installation des parcs éoliens, pour atteindre cet objectif nous avons suivi la méthodologie suivante:

-le premier chapitre sera consacré à l'étude aux concepts de la maintenance industrielle en général qui est un enjeu clé pour la productivité des usines, en termes de sécurité des équipements et d'assurance de la continuité du processus de production.

-Dans le deuxième chapitre nous présentons une vue générale sur l'installation d'un parc d'éoliennes et les problèmes qui rencontrent dans l'installation et Nous montrons ses pannes techniques.

-Dans le troisième chapitre, sera consacré à l'étude de la maintenance du parc éolien.

## ***Chapitre I***

### ***Généralités sur la maintenance industrielle***

#### **INTRODUCTION**

La maintenance est devenue à l'époque actuelle au sein de toutes les entreprises et des appareils de production en général, une des armes de la production est une des fonctions de l'entreprise, mais ce n'est pas une fin en soi. A ce titre, il est difficile à lire et parfois méconnu des décideurs qui sous-estiment son influence. Cependant, il devient une composante de plus en plus sensible de la performance des entreprises. Il est donc important de mieux le faire connaître. Là où l'augmentation de la productivité est une préoccupation pour toutes les entreprises, ce qui met Les questions de sécurité opérationnelle sont au cœur de leurs préoccupations. La conception, la production et le marketing sont des métiers « naturels », facilement reconnaissables et rarement négligés, et à juste titre. En revanche, la maintenance n'est qu'un support à la production, son principal client. Il s'agit donc d'une fonction "cachée", qui agit comme un prestataire de services interne et, de plus, est très évolutive. D'après l'avancement de la maintenance, il a donner une contribution essentielle à la sûreté de fonctionnement de l'actif Coût élevé des temps d'arrêt, l'investissement dans la stratégie de maintenance contribue à les résultats finaux de l'entreprise et devient l'une des fonctions de base dans le système produire. Il est facile de démontrer la nécessité d'une gestion informatisée de ce domaine leurs avantages, notamment pour les systèmes qui assurent le bénéfice des connaissances

Travaux d'entretien effectués. Dans ce chapitre, nous fournissons quelques informations de base sur les techniques de maintenance.

## **I.1. LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE**

### **I.1.1. DEFINITION DE LA MAINTENANCE**

La maintenance est définie comme l'ensemble des procédures de maintien ou de remise en état d'un bien dans un état déterminé ou capable de fournir un service particulier. D'après l'association française de normalisation (AFNOR X 60-010-1994) pour assurer la continuité de service, ainsi, la maintenance consiste à effectuer des dépannages, des graissages, des inspections, des réparations, des améliorations, etc., ce qui permet de maintenir en place les capacités des équipements pour assurer la continuité et la qualité de la production à un coût total optimal, durant le cycle de vie d'un bien [1] :

- Rétablir : contient la notion de « correction » consécutive à une perte de fonction.
- État spécifié ou service déterminé : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux caractéristiques.
- Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité.

Cela met en évidence le rôle important des opérations de maintenance dans l'atteinte des objectifs tout en traitant les cas afin de réduire les arrêts de production et de les éviter si possible, Les cinq zéros symbolisant les objectifs, concernent en effet la maintenance, c'est un fonctionnement avec [2] :

- Zéro défaut : le processus de fabrication doit limiter au maximum les défauts de fabrication de manière à éviter le gaspillage des ressources utilisées pour produire
- Zéro panne : la recherche d'une efficacité optimale du processus productif se traduit par la mise en place d'un système de maintenance préventive qui vise à éviter les pannes. (Ce qui entraîne alors un arrêt temporaire de la production) ;
- Zéro délai : par la mise en place d'un système de production en continu ce qui dans le cadre d'un mode de production flexible se traduit par l'élaboration de processus de production facilement reprogrammable et adaptables ;
- Zéro stock : par la suppression des stocks de produits finis ou de produits intermédiaires qui coûtent chers à l'entreprise ;

- Zéro papier : la flexibilité de l'outil de production ne pourra être obtenu que par une organisation plus souple et donc moins dépendante de procédures administratives complexes qui ralentissent le processus de décision [3]

### I.1.2. TYPES DE MAINTENANCE

Il existe deux principaux types de maintenances ; maintenance corrective et maintenance préventive (Fig. I.1)

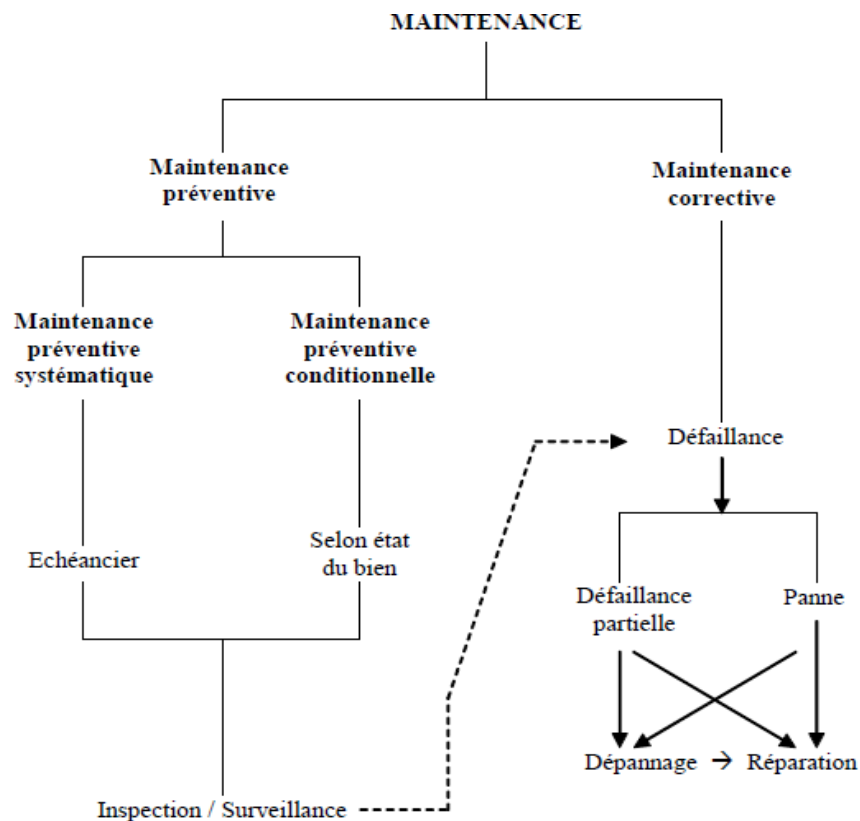


Fig. I.1 Types de maintenance

#### I.1.2.1. MAINTENANCE CORRECTIVE

C'est une maintenance destinée à rendre la santé aux machines qui l'on perdue. C'est une maintenance peu efficace pour les machines vitales de production mais qui trouve son application bien adaptée à certains matériels peu coûteux, et hors production, comme les appareils domestiques de confort, à titre d'exemple, ses actions s'effectuent par étapes, dans l'ordre suivant [4] :

- Test : comparaison des mesures avec une référence,
- Détection : déceler l'apparition d'une défaillance,

- Localisation : les éléments par lesquels la défaillance se manifeste,
- Diagnostic : analyse des causes de la défaillance,
- Dépannage et réparation : remise en état (avec ou sans modification),
- Contrôle : contrôle du bon fonctionnement,
- Amélioration éventuelle : éviter la réapparition de la panne,
- Historique : mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

Une intervention de la maintenance corrective peut être de caractère provisoire (dépannage) appelée maintenance palliative, ou de caractère définitif (réparations) appelé maintenance curative et dans la maintenance corrective deux aspects : la maintenance palliative et la maintenance curative (Fig. I.2) [5].

#### I.1.2.1.1. MAINTENANCE CORRECTIVE CURATIVE

Elle permet de rétablir un matériel ou une entité dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Elle ne prend en compte que les défaillances dites catalectiques.

#### I.1.2.1.2. MAINTENANCE CORRECTIVE PALLIATIVE

Elle permet à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Étant entendu que ces actions de dépannage seront suivies d'actions curatives, elle ne prend en compte que les défaillances dites catalectiques.

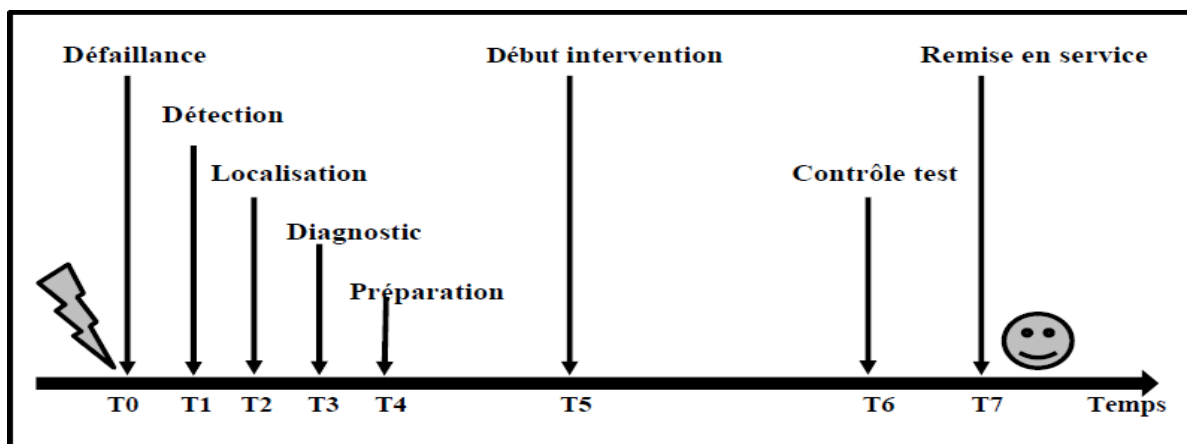


Fig. I.2. Processus de déroulement d'une maintenance corrective d'un équipement

### **I.1.2.2. LA MAINTENANCE PREVENTIVE**

Elle a pour mission de conserver les machines en bonne santé. Son coût direct, parfois élevé, oblige à considérer deux modes d'application [4]:

- Le mode préventive systématique
- Le mode préventive conditionnel

#### **I.1.2.2.1. LA MAINTENANCE PREVENTIVE SYSTEMATIQUE**

Consiste à opérer des remplacements systématiques de composants, à intervalles réguliers, même si les pièces déposées sont encore en assez bon état. C'est un moyen sûr d'avoir des machines fiables, Mais c'est un moyen coûteux qui ne se justifie que lorsque la machine est vitale dans l'entreprise, qu'elle est inaccessible en cours de fabrication, que la fabrication ne peut être arrêtée sans dégradations majeures et que le coût des pièces remplacées est faible au regard de ceux des investissements et de la production. Par exemple en métallurgie, en chimie lourde, en raffinerie, en usine à risques...[4].

#### **I.1.2.2.2. LA MAINTENANCE PREVENTIVE CONDITIONNELLE**

Consiste à n'intervenir pour remplacer les composants, ou faire des opérations de remise à l'état initial, qu'après avoir constaté des dégradations significatives et autant que possible fabrication en marche. L'idéal est que la machine puisse fonctionner le plus longtemps possible pour n'être arrêtée que juste avant que la panne ne survienne, ou que des pertes de fabrication n'apparaissent. Cela implique une surveillance constante et complète, avec des systèmes étalonnés pour déclencher l'alerte quand les limites sont atteintes. Ces systèmes d'alerte peuvent être manuels ou automatiques, extrêmement simples ou très [4]

## **I.2. LA COURBE EN BAIGNOIRE**

La courbe en baignoire  $\lambda(t)$  représente l'évolution du taux de panne d'un équipement durant son cycle de vie. On considère trois périodes distinctes [7] :

- Phase de jeunesse:  $\lambda(t)$  décroît rapidement. C'est la période de mise en service et de rodage de l'installation. Les défaillances sont dues à des anomalies ou des imperfections de montage. Dans cette phase, seule la maintenance corrective

est applicable.

- Phase de maturité:  $\lambda(t)$  est pratiquement constant. C'est la période de vie utile où les défaillances apparaissent sans dégradation préalable visible, pour des causes diverses. Le taux de défaillance est constant ou légèrement croissant, correspondant au rendement optimal de l'équipement. Dans cette phase une maintenance préventive est applicable.
- Phase de vieillesse :  $\lambda(t)$  croît rapidement. Un mode de défaillance prédomine et entraîne une dégradation accélérée: c'est la période d'obsolescence, souvent due à l'usure mécanique, la fatigue, l'érosion ou la corrosion.  $\lambda$  un certain point de  $\lambda(t)$  le matériel est hors service. Une maintenance préventive conditionnelle peut éventuellement être mise en place.

Dans la première phase, seule la maintenance corrective est pratiquée. C'est seulement dans la seconde phase (phase de maturité) qu'intervient la maintenance préventive. La figure I.3, représentant la variation du taux de défaillance en fonction du temps, est appelée « courbe en baignoire » [8].

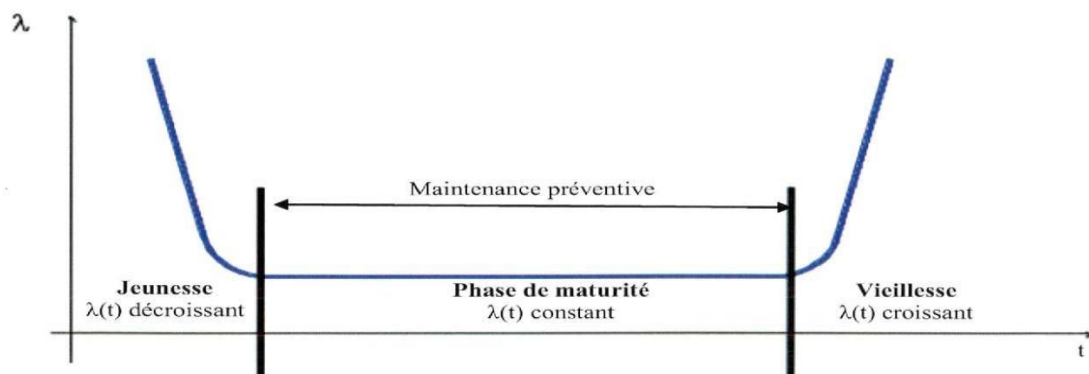


Fig. I.3. Courbe en baignoire

Cette courbe en baignoire montre bien que la maintenance préventive n'est réellement justifiée que pour la phase de maturité. Dans cette période, le taux de défaillance est sensiblement constant et égal à l'inverse de l'indice de fiabilité: MTBF (Mean Time Between Failure). La MTBF, ou moyenne des temps de bon fonctionnement, est la valeur moyenne des temps entre deux défaillances consécutives [8]. Ainsi faut-il retenir que durant la phase de maturité de l'équipement, le taux de défaillance est constant :  $MTBF = \text{Somme des Temps de Bon Fonctionnement} / \text{nombre de défaillances}$ .

$$MTBF = 1/\lambda \quad (I.1)$$

### I.3. ORGANISATION DU SERVICE MAINTENANCE

L'organisation de la maintenance au sein d'une entreprise industrielle met en évidence les domaines de responsabilité de chacun des composants. La préparation des travaux de maintenance, la planification des travaux de maintenance, le bureau d'études et des méthodes, la gestion des ressources humaines, la fonction, maintenance regroupe un certain nombre de tâches qui doivent collaborer étroitement afin de réaliser l'objectif qui lui est assigné. En général, la fonction de maintenance comprend des tâches telles que : les méthodes, la planification, la production et l'entreposage (Fig. I.4).

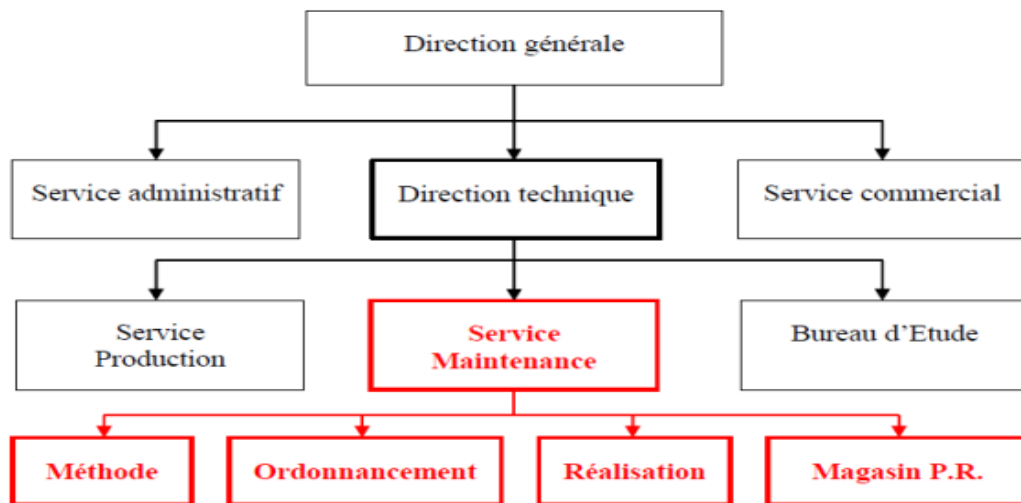


Fig. I.4. Structure du service maintenance

### I.4. METHODES ET TECHNIQUES D'ORDONNANCEMENT

Elles peuvent se regrouper en deux grandes familles, selon le principe de base qu'elles utilisent :

- Les méthodes de type diagramme (GANTT)
- Les méthodes à chemin critique (PERT)

#### I.4.1. LA METHODE DE PERT

La plupart des méthodes ont été mises au point pour mener à bien l'effort de reconstruction après la seconde guerre mondiale. La méthode « PERT » (Program Evaluation and Research Task ou Program Evaluation and Review Technic) a été mise au point lorsque

les Etats-Unis ont entrepris de créer leur force d'attaque nucléaire (sous-marins et fusée Polaris). Il fallait aller vite pour rattraper le retard pris sur l'URSS. Ce projet était soumis à de nombreux problèmes techniques :

- Délai fixé,
- Coordination de 250 fournisseurs et 9000 sous-traitants.

Pour obtenir l'efficacité maximale des efforts de chacun pour l'agencement du projet, il fallait disposer d'une méthode systématique de planification, de contrôle, et de correction. La création de la méthode PERT fut décidée dans ce but, et son utilisation ramena la durée du projet de 6 ans à 2 ans et 1/2. Dans le même temps pour les mêmes raisons d'autres méthodes ont fait leur apparition : réseaux de PETRI, méthode MPM (Méthode des Potentiels Métra) en France, diagrammes de GANTT, ou encore graphes « chemin de fer » [9].

#### I.4.1.1. PRINCIPE DE LA METHODE

Réduire la durée totale d'un projet par une analyse détaillée des tâches ou activités élémentaires et de leur enchaînement. On étudie les délais sans prendre en compte les charges [9].

#### I.4.1.2. PRESENTATION LA METHODE

On utilise un graphe de dépendances, pour chaque tâche, on indique une date de début et de fin au plus tôt et au plus tard. Le diagramme permet de déterminer le chemin critique qui conditionne la durée minimale du projet. Dans un graphe PERT (Fig. I.5):

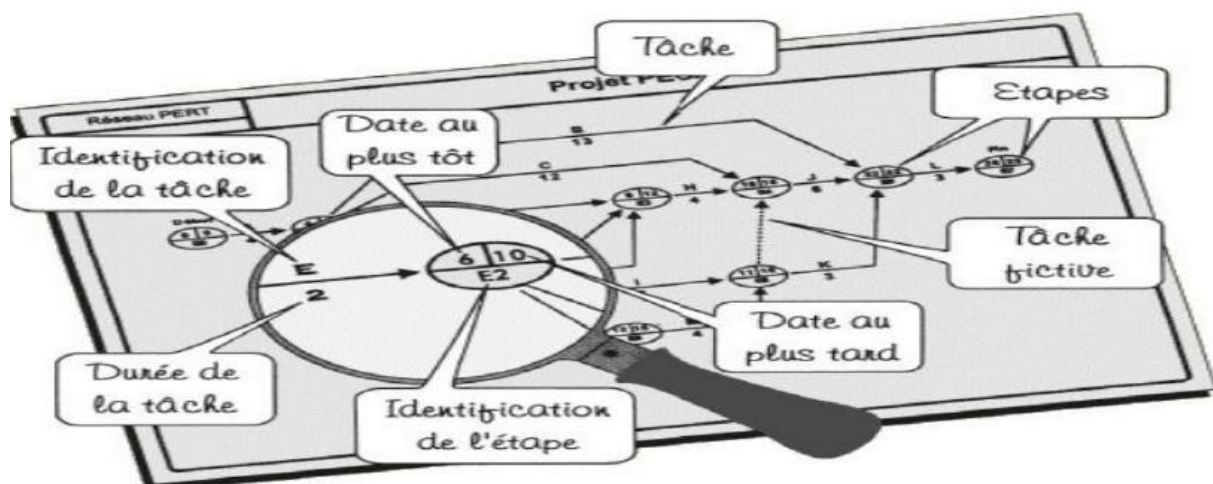


Fig. I.5 Présentation de diagramme de PERT.

- Chaque tâche est représentée par un arc, auquel on associe un chiffre entre parenthèses qui représente la durée de la tâche.
- Entre les arcs figurent des cercles appelés « sommets » ou « événement » qui marquent l'aboutissement d'une ou plusieurs tâches. Ces cercles sont numérotés afin de suivre l'ordre de succession des divers événements.

On peut citer comme des règles (Fig. I.6) :

- On appelle étape, le début ou la fin d'une tâche, habituellement on numérote les étapes de telle façon que le numéro du sommet au début d'un arc soit inférieur au numéro du sommet en fin de l'arc. On indique aussi leur temps de réalisation au plus tôt et au plus tard.
- Toute tâche a une étape de début et une étape de fin, une tâche suivante ne peut démarrer que si la tâche précédente est terminée.
- Deux tâches C et D qui sont simultanées (c'est à dire qui commence en même temps) sont représentées de la manière suivante :

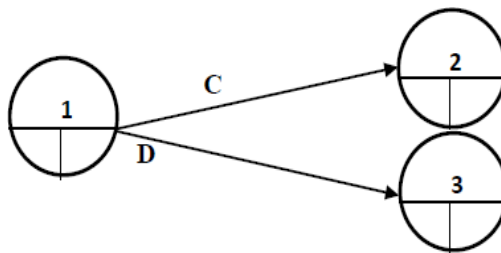


Fig. I.6 Règle 1 de diagramme de PERT.

- Deux étapes E et F qui sont convergentes (c'est à dire qui précède une même étape G) sont représentées de la manière suivante (Fig. I.7) :

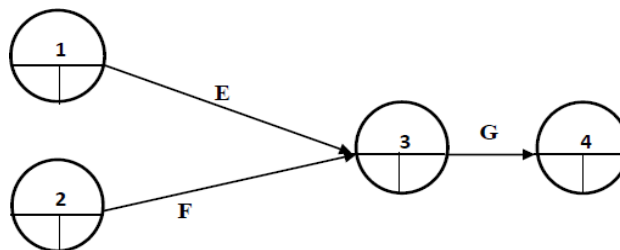


Fig. I.7 Règle 2 de diagramme de PERT

Parfois, il est nécessaire d'introduire des tâches fictives. Une tâche fictive a une durée nulle. Elle ne modifie pas le délai final. Par exemple, si la tâche D succède aux tâches A et

C, et que la tâche B succède seulement à la tâche A, on représentera le problème de la manière suivante (Fig. I.8) :

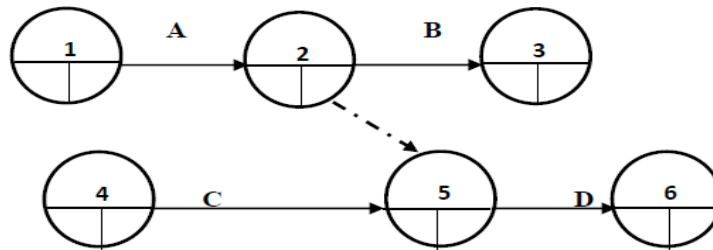


Fig. I.8 Règle 3 de diagramme de PERT.

Dans la méthode PERT, on calcule deux valeurs pour chaque étape :

- La date au plus tôt : il s'agit de la date à laquelle la tâche pourra être commencée au plus tôt, en tenant compte du temps nécessaire à l'exécution des tâches précédentes ;
- La date au plus tard : il s'agit de la date à laquelle une tâche doit être commencée à tout prix si l'on ne veut pas retarder l'ensemble du projet ;
- Le chemin critique est le chemin formé par les étapes de marge nulle, c'est-à-dire un ensemble d'activités tel que tout retard dans leur exécution provoquerait un retard de la fin du projet, chaque tâche du chemin critique est une tâche critique. Il devra être tracé de l'étape 0 à l'étape finale du projet, en reliant toutes les étapes critiques (Fig. I.9). La durée totale des tâches critiques donne la durée minimale de réalisation du projet. Le moindre retard au démarrage de l'une de ces tâches entraîne un retard équivalent sur la date de fin du projet [10].

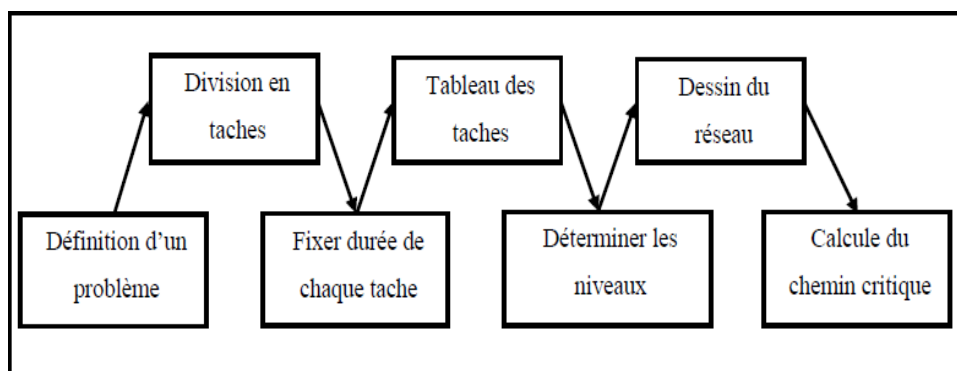


Fig. I.9 Méthodologie de réalisation d'un projet.

- Exemple de calcul (Exemple de la figure Fig. I.10):

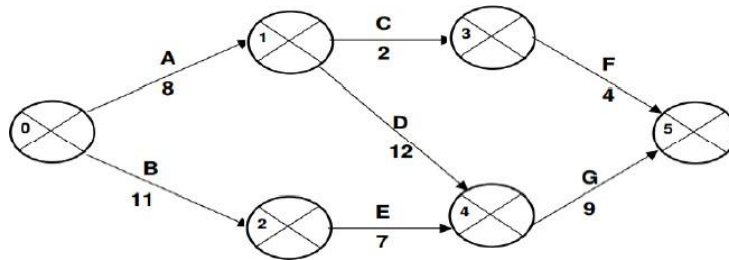


Fig. I.10 Exemple de diagramme de PERT

- Date au plus tôt d'une étape = date au plus tôt de l'étape précédente + durée de la tâche comprise entre les deux étapes.
  - Le calcul part de l'origine, étape 0, au temps 0 ;
  - L'étape 1, n'est reliée à l'origine que par la tâche A, qui dure 8 jours ;
  - L'étape 1 est donc atteinte au plus tôt à :  $0 + 8 = 8$  jours ;
  - L'étape 2 est atteinte au plus tôt à :  $0 + 11 = 11$  jours ;
  - L'étape 4 est atteinte par 2: A + D et B + E soit :  $8 + 12 = 20$  jours et  $11 + 7 = 18$  jours
  - Pour que l'étape 4 soit atteinte, il faut que D et E soient achevées ; on prend donc 20 jours (Fig. I.11) ;

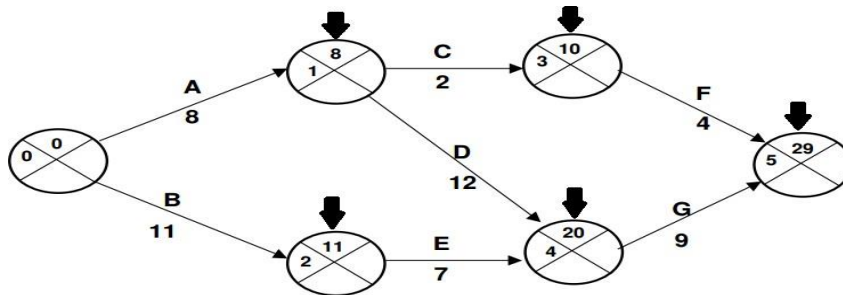


Fig. I.11 Date au plus tôt d'une étape diagramme de PERT.

- Date au plus tard d'une étape = date au plus tard de l'étape suivante - durée de la tâche comprise entre les deux étapes.
  - Le calcul part de l'étape finale et remonte vers le début du projet.
  - Pour l'étape 3 on a :  $29 - 4 = 25$  jours ;
  - Pour l'étape 4 on a :  $29 - 9 = 20$  jours ;
  - Pour l'étape 2 on a :  $20 - 7 = 13$  jours ;
  - Pour l'étape 1 on a :  $20 - 12 = 8$  jours.  $25 - 2 = 23$  jours. ; on retient donc 8 jours ;

➤ Pour l'étape 0 on a :  $8 - 8 = 0$  jours.  $13 - 11 = 2$  jours. ; on retient donc 0 jours.

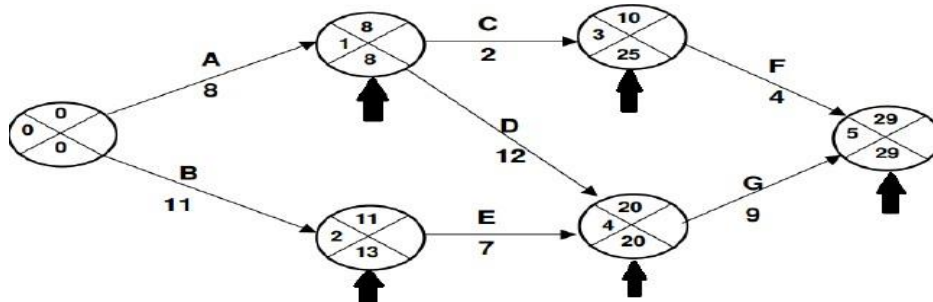


Fig. I.12 Date au plus tard d'une étape de diagramme de PERT.

• La marge totale : C'est le retard maximum que peut prendre une tâche sans porter atteinte au plus tard de la tâche suivante (Fig. I.13, Fig. I.14) donc sans retarder la fin des travaux).  $MT = \text{la date au plus tard} - \text{la date au plus tôt}$ .

- Le calcul de la marge totale de la tâche A sera :  $8 - 8 = 0 - 0$  soit 0 ;
- Le calcul de la marge totale de la tâche B sera :  $13 - 11$  soit 2 ;
- Le calcul de la marge totale de la tâche C sera :  $25 - 10$  soit 15 ;
- Le calcul de la marge totale de la tâche D sera :  $20 - 20 = 8 - 8$  soit 0 ;
- Le calcul de la marge totale de la tâche E sera :  $13 - 11$  soit 2 ;
- Le calcul de la marge totale de la tâche F sera :  $29 - 10$  soit 15 ;
- Le calcul de la marge totale de la tâche G sera :  $29 - 20 = 20 - 20$  soit 0.

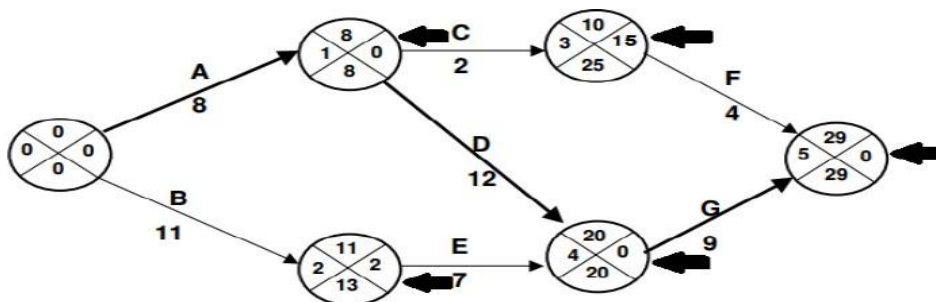


Fig. I.13 La marge totale de diagramme de PERT.

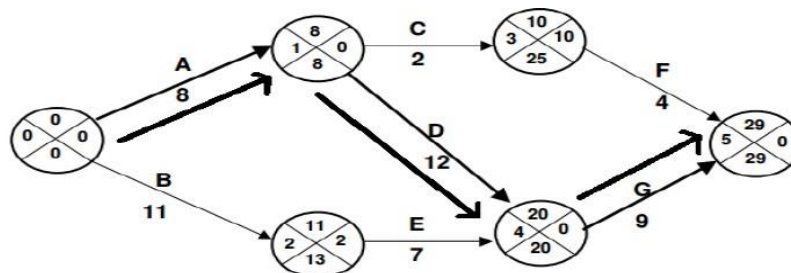


Fig. I.14 Le chemin critique de diagramme de PERT

## I.4.2. LA METHODES DE GANTT

La méthode de Gantt, est une autre méthode d'ordonnancement des tâches développée par Henry L. Gantt, ingénieur américain, vers 1910 et dont le but est identique à celui de la méthode Pert. La différence entre les deux méthodes réside sur la représentation graphique des tâches. La méthode de Gantt, souvent jugée plus souple, permet de visualiser d'un seul coup d'œil le retard ou l'avancement des travaux [12].

### I.4.2.1. LES BUTS DE LA METHODE DE GANTT

Principalement utilisé comme outil de communication majeur entre les différents acteurs impliqués dans la réalisation d'un projet, le diagramme de Gantt permet de :

- Déterminer la durée optimale nécessaire pour réaliser de bout en bout un projet ;
- Visualiser l'enchaînement des différentes tâches et étapes du projet ;
- Calculer les marges des différentes tâches du projet
- Identifier les tâches critiques (tâches pour lesquelles aucun retard ne sera toléré)
- Gérer au mieux l'utilisation des ressources ;
- Suivre au quotidien l'état d'avancement du projet ;
- Prévoir suffisamment à l'avance les actions correctives à entreprendre en cas de retard ou de dépassement des charges prévues [12].

### I.4.2.2. PRESENTATION DE LA METHODE

Il faut tout d'abord :

- se fixer le projet à réaliser,
- définir les différentes opérations à réaliser dans le cadre du projet,
- définir les durées de ces différentes opérations,
- définir les liens entre ces différentes opérations.

**Exemple :** On veut organiser la production d'un poste de travail pendant une semaine.  
Opérations à réaliser (Fig. I.19) :

Réf des pièces à produire	Durée de fabrication
A	3 heures
B	6 heures
C	4 heures
D	7 heures
E	5 heures

Fig. I.19 Opérations à réaliser

Pour respecter les délais clients, il est nécessaire de fabriquer :

B et D après A, C après B, E après D.

Le diagramme de GANTT se présente sous forme d'un tableau quadrillé où :

- chaque colonne correspond à une unité de temps,
- chaque ligne correspond à une opération à réaliser.

On définit une barre horizontale pour chaque tâche ; la longueur de celle-ci correspond à la durée de la tâche. La situation de la barre sur le graphique est fonction des liens entre les différentes tâches (Fig. I.16). Ainsi, le GANTT correspondant à l'exemple précédent est le suivant :

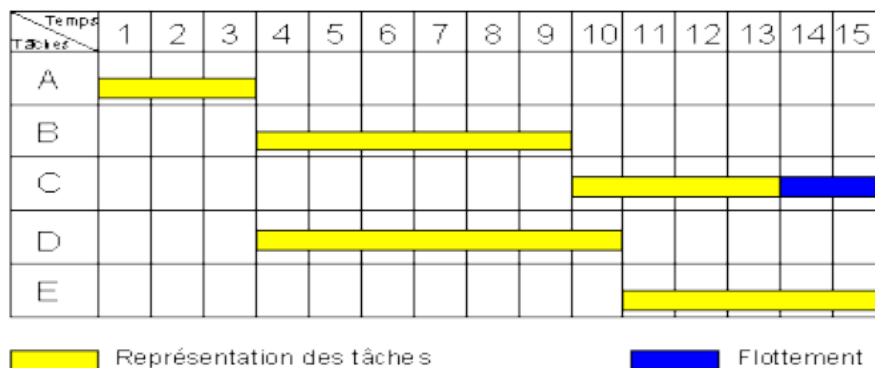


Fig. I.16 Méthode de GANTT

#### I.4.2.3. DATE SAU PLUS TOT ET AU PLUS TARD

Concernant les délais, le diagramme de Gantt permet de déterminer les dates de réalisation des différentes opérations, en tenant compte [13] :

- **de la date de début au plus tôt** : il n'est pas possible de commencer une opération avant celle-ci. Choisir de commencer une opération à la date au plus tôt est intéressant, car cela laisse une marge de manœuvre, mais cela peut

aussi parfois poser des difficultés, par exemple du stockage du produit de cette opération, si le délai entre l'opération donnée et la suivante est trop important [13] ;

- **de la date de début au plus tard** : c'est la date la plus défavorable sans mettre le projet en péril. Choisir de commencer une opération à la date au plus tard est techniquement possible, mais constitue toujours une difficulté, car le moindre retard dans l'exécution de cette tâche entraînera automatiquement un retard de l'ensemble du projet [13].

#### I.4.2.4. MARGES

La marge de cette méthode est définie comme le temps restant à courir jusqu'à la livraison - le temps total d'achèvement

#### I.4.2.5. EXEMPLE D'APPLICATION

Comme exemple explicatif, on prend les tâches de préparation d'un repas comme il est présenté dans la figure I.17

##### 1 Taches

- A : choisir le menu (30 min)
- B : acheter les ingrédients (90 min)
- C : préparer l'apéritif (30 min)
- D : nettoyer la table (10 min)
- E : mettre la table (10 min)
- F : préparer les ingrédients (30 min)
- G : cuisiner les plats (60 min)
- H : servir le repas (10 min)

##### 2 Contraintes

- B doit être après A
- C et F doivent être après B
- E doit être après D
- G doit être après F
- H doit être après C, G et E

	Durée	antécédent	successeur
A	30	-	B
B	90	A	C-F
C	30	B	H
D	10	-	E
E	10	D	H
F	30	B	G
G	60	F	H
H	10	C-G-E	-

Fig. I.17 Tâches et durée des tâches de la préparation d'un repas

## ***Chapitre II***

### ***Installation éolienne***

#### **INTRODUCTION**

L'énergie éolienne a connu une augmentation significative partout dans le monde. Selon le Global Wind Energie Council (GWEC), au cours des deux dernières décennies dans la production d'électricité pour répondre aux besoins énergétiques de la société d'aujourd'hui, où L'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité est devenue plus acceptable et en demande avec la présence de nombreuses sources d'énergie sur le marché, Bien que le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction de l'emplacement, de la météo, du climat et des saisons, il est donc essentiel de comprendre les caractéristiques de la ressource éolienne pour tous les aspects de l'exploitation de l'énergie éolienne. De l'emplacement correct et de la prévision de la faisabilité économique des projets de parcs éoliens à la conception des éoliennes elles-mêmes, Cette énergie permet la production d'électricité, grâce à Cette machine permet de convertir l'énergie cinétique du vent, en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Dans ce chapitre, nous fournirons quelques informations sur l'installation d'un parc éolien et aussi les problèmes que nous rencontrons dans le processus d'installation,

et concluons avec les pannes techniques des éoliennes.

## **I. INSTALLATION D'UN PARC EOLIEN**

### **II.1. NOTION DE PARC EOLIEN**

Un parc éolien est un ensemble de plusieurs aérogénérateurs installés sur un site et connectés au même point de livraison au réseau d'électricité. la ferme est constituée de plusieurs éoliennes distantes entre elles d'au moins 200 m , Bien que chaque machine ait une faible emprise au sol, il faut disposer d'une superficie de l'ordre de 10 hectares pour un parc éolien significatif. L'installation d'un parc éolien est soumise à plusieurs réglementations en particulier au titre de code de l'énergie, du code de l'urbanisme, du code forestier et du code de l'environnement. Pour optimiser certains frais de construction (raccordement électrique, chemin d'accès, etc.) et surtout éviter l'éparpillement de ces édifices dans le paysage, les éoliennes sont généralement regroupées sur un même site [15].

#### **II.1.2. CARACTERISTIQUES GENERALES D'UN PARC EOLIEN**

Un parc éolien est une centrale de production d'électricité à partir de l'énergie du vent. Il est composé de plusieurs aérogénérateurs et de leurs annexes (Fig. II.1) :

- Plusieurs éoliennes fixées sur une fondation adaptée, accompagnée d'une aire stabilisée appelée « plate-forme » ou « aire de grutage »,
- Un réseau de câbles électriques enterrés permettant d'évacuer l'électricité produite par chaque éolienne vers le ou les poste(s) de livraison électrique (appelé « réseau inter-éolien »),
- Un ou plusieurs poste(s) de livraison électrique, concentrant l'électricité des éoliennes et organisant son évacuation vers le réseau public d'électricité au travers du poste source local (point d'injection de l'électricité sur le réseau public),
- Un réseau de câbles enterrés permettant d'évacuer l'électricité regroupée au(x) poste(s) de livraison vers le poste source (appelé « réseau externe » et appartenant le plus souvent au gestionnaire du réseau de distribution d'électricité),
- Un réseau de chemins d'accès,

- Éventuellement des éléments annexes tels que mât de mesure de vent, aire d'accueil du public, aire de stationnement, etc [15].

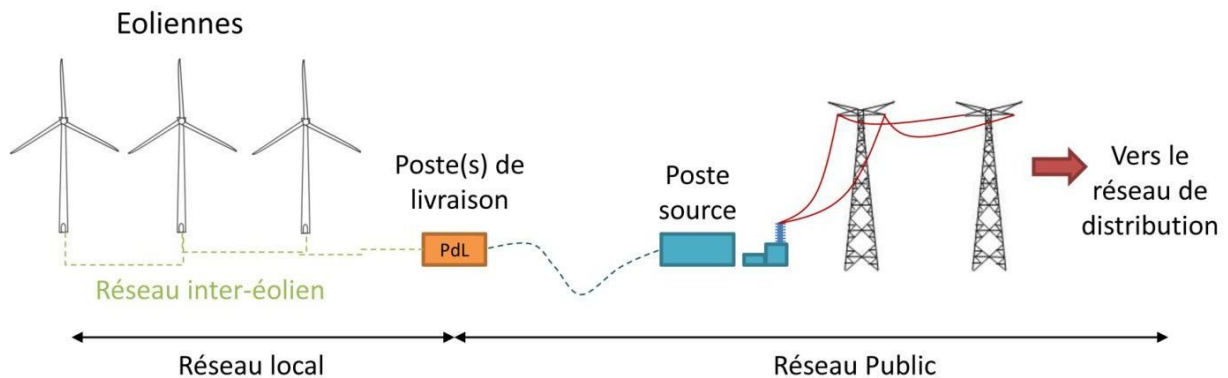


Fig. II.1. Raccordement électrique des installations

## II.2. ÉTAPES DE LA PLANIFICATION ET DE LA CONSTRUCTION D'UN PARC EOLIEN

Il existe de nombreuses étapes de développement avant qu'une éolienne ou un parc éolien puisse être approuvé et construit. Une fois qu'un site a été sélectionné pour son bon potentiel global, le travail commence sur plusieurs tâches principales :

- **Évaluation du vent** : Une autre étape très importante est l'évaluation de la ressource éolienne. Les scientifiques et les ingénieurs utilisent des mâts météorologiques pour mesurer la vitesse du vent et d'autres conditions climatiques pendant au moins un an. Ces données sont ensuite utilisées pour estimer la quantité d'énergie que le parc éolien produira. On suppose souvent que cela doit être fait avant que toute considération sérieuse ne soit envisagée.
- **Conception de parcs éoliens** : Ceci est important si le projet est un parc éolien. Les données de vent sont combinées avec des informations topographiques pour concevoir le parc éolien. Les ingénieurs utilisent ces données pour modéliser le flux de vent, les performances des éoliennes, les niveaux sonores et d'autres paramètres afin d'optimiser l'emplacement des éoliennes. Ils conçoivent également les routes d'accès, les fondations des turbines et le réseau électrique local, ainsi que le raccordement au réseau électrique.
- **Procédure une Étude environnementale liée à la biologie et à la géologie** : Mesurer la température et la salinité de l'eau, mesurer l'intensité des courants d'eau et d'air, ainsi que la vitesse et la direction de l'eau Détermination des

milieux de sols fragiles Mesure de l'intensité de la résistance de la terre aux charges

- **Détermination des milieux aquatiques fragiles** : Mesure de la profondeur, de la hauteur maximale des marées, de la hauteur maximale des vagues, de leur direction et de leur durée
- **L'évaluation de l'impact environnemental** : Des évaluations environnementales sont menées pour identifier tout impact sur le paysage, les plantes et la faune, le sol et l'eau, l'utilisation des terres ou d'autres activités telles que l'aviation et les télécommunications. Si des impacts négatifs sont identifiés, la conception est ajustée pour les éviter ou les atténuer.
- **Préparation du chantier** : Construire des routes d'accès et dégager les zones où seront érigées les éoliennes ; puis préparez les fondations; faire l'excavation, puis installer les coffrages et couler le béton.
- **Construction** : Les pièces de l'éolienne sont fabriquées et pré-assemblées en composants principaux en usine, puis expédiées sur le site du parc éolien où l'assemblage final aura lieu. Lorsque tous les composants ont été reçus, le montage peut avoir lieu. Une grue est utilisée pour ériger la tour et installer la nacelle et le rotor avec son moyeu et ses pales. Au sol, le réseau de collecte électrique est installé et raccordé au réseau via la sous-station.
- **Mise en service** : Enfin, l'éolienne est testée, tous les composants sont calibrés sur site et vérifiés par rapport aux spécifications des fournisseurs, avant de devenir pleinement opérationnels [16].

## II.3. DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION EOLIENNE

### II.3.1. CRITERES DE CHOIX D'UN SITE EOLIEN

L'emplacement des éoliennes n'est pas choisi par hasard, il y a des critères précis. Le choix de l'emplacement est judicieux pour le rendement d'une éolienne et cela est en rapport direct avec le vent. Tout d'abord, les vents en mer sont quasiment constants et sont plus rapides (il n'y a aucun obstacle pour les casser). Mais malgré tout, cela pose des contraintes supplémentaires, ce qui augmente le coût de l'installation d'une éolienne « off-shore », mais au final, ce choix d'emplacement est relativement plus intéressant sur le long terme. Tout comme la mer, les montagnes sont aussi un lieu très

recherché (Fig. I.2). Celles-ci freinent aussi bien le vent qu'elles créent des effets avec celui-ci [17].

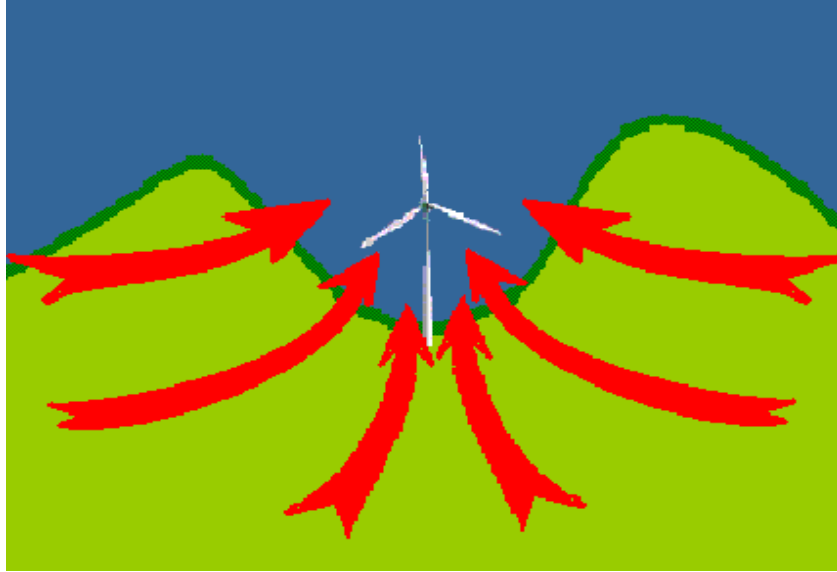


Fig. II.2 Effet tunnel

### II.3.2. ANALYSE DE GISEMENT ENERGETIQUE DU VENT

#### II.3.2.1. LA RESSOURCE EN VENT

Le paramètre le plus important pour l'installation d'éolienne est la vitesse du vent sur le lieu exact de l'implantation de futures éoliennes. C'est le paramètre le plus difficile à obtenir. Ainsi, pour installer une éolienne, il faut être sûr que le ressource en vent soit suffisante, c'est-à-dire que la vitesse du vent soit ni trop faible pour pouvoir faire tourner l'éolienne ni trop élevée car sinon celle-ci s'arrêterait pour des raisons de sécurité ou d'usure. L'étude du gisement est une composante essentielle d'un projet éolien, une infime erreur dans l'étude de la ressource en vent peut remettre en cause la rentabilité d'un projet. Une autre condition, en dehors de la vitesse du vent, est que celui-ci doit être constant avec très peu de changement d'orientation [18].

#### II.3.2.2. APPAREILS POUR LA MESURE DU VENT

La méthode la plus répandue est l'utilisation d'un mât de la taille souhaitée sur lequel sont positionnés un ou plusieurs anémomètres. Un anémomètre se compose en général de trois demi-coquilles disposées à 120 degrés, d'un dispositif de compteur de tours et d'un appareil d'enregistrement de données électronique. Les avantages de cet

anémomètre sont sa simplicité et l'absence de limitation dans la gamme de vitesse du vent mesurée. Les données sont enregistrées et stockées pendant plusieurs mois ou années. Ces données permettent ensuite de déterminer les fonctions de densité de probabilité de la vitesse du vent [18].

### II.3.3. PUISSANCE D'UNE EOLIENNE

Le vent fournit une énergie cinétique puisqu'il s'agit d'une masse d'air qui se déplace. Cette énergie cinétique est donnée par l'équation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} mU^2 \quad (\text{II.1})$$

On peut dire aussi que la puissance est la vitesse à laquelle l'énergie est disponible, ou la vitesse à laquelle l'énergie traverse une surface par unité de temps :

$$P = \frac{1}{2} \rho StU^3 \quad (\text{II.2})$$

### II.3.4. MESAUREMENT DE BRUIT

Le niveau de puissance acoustique d'une éolienne est normalement déterminé par des expériences sur le terrain. Des expériences en plein air sont nécessaires en raison de la grande taille des éoliennes modernes et de la nécessité de déterminer leurs performances sonores pendant le fonctionnement. Le niveau de puissance acoustique ne peut pas être mesuré directement mais résulte d'une série de mesures de niveaux de pression acoustique réalisées autour de l'éolienne à différentes vitesses de vent desquelles ont été déduits les niveaux de pression acoustique de fond.

Effet, si une seule éolienne donne 50 dB de bruit, deux éoliennes côte à côte en produiront seulement 53 dB. Pour effectuer ce calcul, nous avons indiqué au logiciel la vitesse moyenne du vent à cet endroit, mais aussi la hauteur à laquelle nous voulions nos mesures (Fig. II.3).

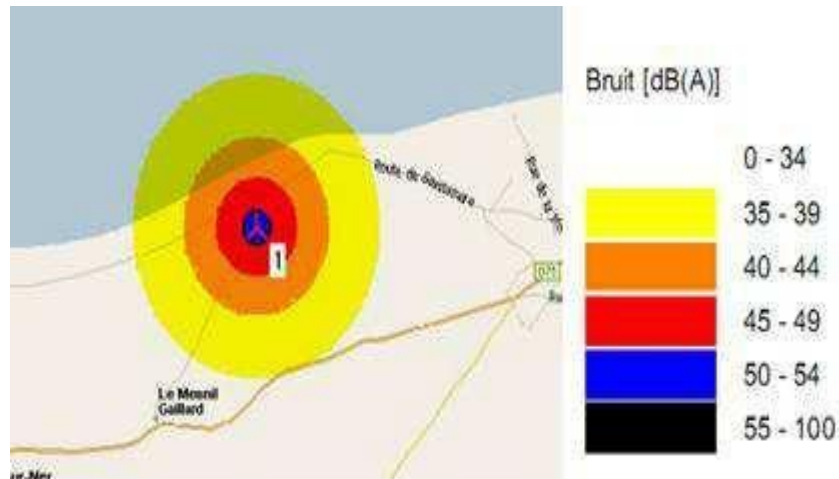


Fig. II.3 Carte représentant le bruit autour d'une éolienne

## II.4. INSTALLATION DE LA MACHINE

### II.4.1. CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE

Comme nous montre la figure II.4, une éolienne est constituée de :

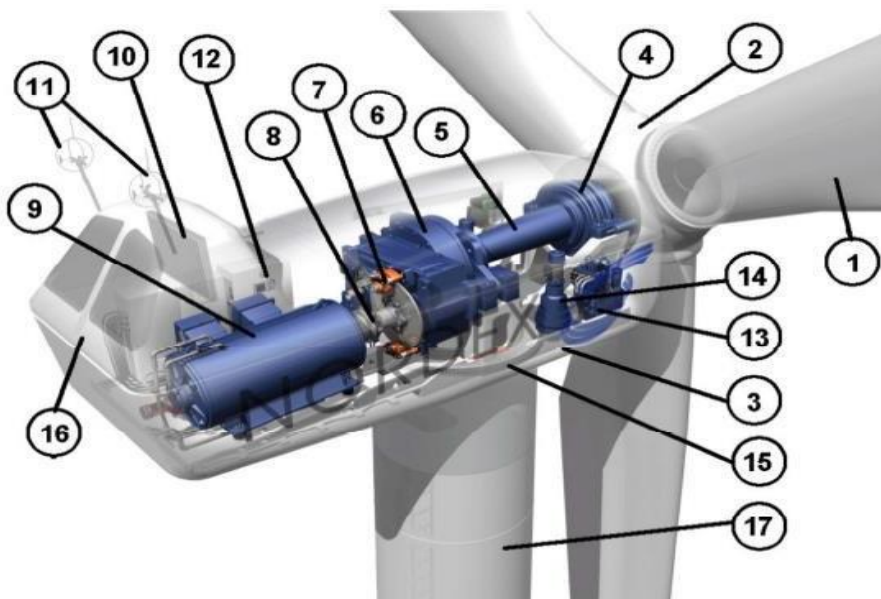


Fig. II.4 Constituants d'une éolienne

**Les pales (1) :** sont conçues en fibre de verre et matériaux composites, son profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes. Elles sont les premiers partis (composantes) mobiles qui captent l'énergie cinétique du vent, et la transmettent au rotor.

**Le moyeu (2) et (4) :** il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

**L'arbre primaire (5) :** il relie les pales au multiplicateur.

**Le multiplicateur (6) :** c'est comme une boîte à vitesse, il permet d'augmenter la vitesse de rotation qui est transmise au générateur.

**Le frein mécanique (7) :** c'est un disque à frein mécanique qui limite la vitesse de l'arbre secondaire en cas des vents violents.

**L'arbre secondaire (8) :** il est situé entre le multiplicateur et la génératrice, pour communiquer l'énergie mécanique.

**Le générateur électrique (9) :** c'est le composant qui assure la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, il peut atteindre jusqu'à 5 MW. Cette énergie électrique peut être un courant continu (produit par une dynamo) ou un courant alternatif (produit par un alternateur) ; ce dernier est le plus utilisé vu son coût moins cher et son bon rendement.

**Le système de refroidissement (10) :** le bon fonctionnement des générateurs nécessite la mise en place d'un système de refroidissement, généralement les fabricants utilisent soit de l'air soit de l'eau pour ça, dans le premier cas (avec l'air) ils placent le générateur dans un conduit d'air frais ; et pour le deuxième cas (avec l'eau), c'est vrai qu'il présente quelques avantages comme d'être plus compact mais il faut installer un radiateur dans la nacelle pour évacuer la chaleur contenue dans le liquide de refroidissement.

**L'anémomètre et la girouette (11) :** pour calculer et mesurer la vitesse du vent on utilise un anémomètre, il possède un axe vertical et trois coupes captant le vent qui entraînent sa rotation ; ces rotations se font décompter électroniquement. Et pour savoir la direction de vent on utilise généralement une girouette. Toutes ces informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.

**L'équipement de contrôle électrique (12) :** sont des composants électriques qui contrôlent tous les autres composants électroniques de l'éolienne (système de freinage, système d'orientation).

**Le système d'orientation de la nacelle (13) (14) :** il s'agit d'une couronne dentée et d'un moteur qui permet d'orienter et placer la nacelle dans l'axe du vent, et puis la verrouiller grâce à un frein.

**Le mécanisme d'orientation (15) :** c'est le mécanisme qui permet de tourner la turbine contre le vent, pour qu'elle soit perpendiculaire au sens du vent, et cela pour éviter ce qu'on appelle l'erreur d'orientation qui cause des pertes importantes de l'énergie du vent qui passe au travers du rotor.

**Le capot en acier (16) :** une tôle en acier qui sert à protéger et couvrir les composants internes de la nacelle.

**Le mat (17) :** c'est le support qui porte l'éolienne (tube en acier, pilier de toute infrastructure), plus sa hauteur est grande plus la vitesse du vent est grande aussi ; généralement on la prend légèrement supérieur au diamètre des pales.

**Les fondations :** c'est sur elle que repose le poids de l'éolienne, elles permettent de fixer et Stabiliser le mat.

**L'armoire de couplage au réseau électrique :** elle est située généralement au pied de l'éolienne, on trouve à l'intérieur les armoires électriques qui contrôlent le fonctionnement de l'éolienne et le rattachement au réseau électrique. Comme il existe un autre type des éoliennes, celle où on n'aura pas besoin du multiplicateur, puisqu'ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone est relié directement aux pales [18].

#### II.4.2. MISE EN ŒUVRE DES FONDATIONS D'UNE EOLIENNE

Les travaux de génie civil propres à l'éolienne consistent en la réalisation d'une fondation assurant l'ancrage de l'édifice dans le sol. Les fondations des éoliennes doivent permettre de reprendre l'ensemble des efforts du vent qui s'applique sur l'éolienne dans les conditions les plus défavorables. Après l'obtention de l'autorisation d'exploiter, une campagne de reconnaissance géotechnique sera réalisée : fouilles à la pelle mécanique jusqu'à 3 m environ, essais en laboratoire sur échantillons de sol prélevés et sondages destructifs à 25 m de profondeur pour les essais pressiométriques. L'analyse de la caractérisation des sols d'assise permettra de définir précisément les dimensions des fondations. Les conditions de nappe étant également très importantes pour le choix du diamètre de fondation de l'éolienne, l'analyse hydrogéologique permettra d'évaluer le niveau des plus hautes eaux, l'argilosité des limons, la présence éventuelle de « nappes perchées » temporaires se développant dans les limons. Suivant le type d'éolienne présélectionné parmi les modèles retenus, et en fonction des résultats

des études de sol approfondies, chaque fondation d'éolienne nécessite environ 500 m<sup>3</sup> de béton.

- **Excavation** : à l'emplacement prévu pour l'éolienne, il est réalisé une excavation suffisante pour accueillir la fondation de l'éolienne, sur environ 3 mètres de profondeur et sur une largeur de 3 m de plus que la taille des fondations. La terre d'excavation est provisoirement stockée aux abords de la fondation, et conservée en d'une réutilisation. Cette terre est triée en fonction de ses caractéristiques (pierre, terre végétale, terre de remblais) et de sa réutilisation dans d'autres zones de travaux du parc éolien (remblais, talus, profilage de bords de voies d'accès, zones temporaires de chantier et restauration d'aires de travail). L'objectif étant que tous les déblais soient réutilisés sur site. S'ils ne peuvent pas être réutilisés, ils sont évacués vers un centre de traitement adapté.
- **Béton de propreté** : sous-couche de béton destinée à obtenir une dalle de niveau et suffisamment stable pour accueillir le ferrailage de la fondation.
- **Pose de l'insert** : le « support » de l'éolienne. Il est tout d'abord posé sur des plots en béton au centre de la fondation ou sur des pieds métalliques. L'insert est ensuite inclus dans la masse de béton. D'autres techniques remplacent cet insert par un ensemble de couronnes et éléments de ferrailage. Dans le cas d'une base du mat en béton, cette pièce d'interface se situe en hauteur.
- **Ferrailage** : avant d'effectuer le coulage du béton, il faut réaliser l'armature métallique qu'il va renfermer. Cette armature rendra le futur massif de béton extrêmement résistant.
- **Coffrage** : c'est une enveloppe extérieure, fixe, qui permet de maintenir le béton pendant son coulage, avant son durcissement.
- **Coulage** : le béton est ensuite coulé à l'intérieur du coffrage à l'aide d'une pompe à béton. Environ 500 m<sup>3</sup> de béton sont coulés pour une éolienne. Sur la phase finale du coulage, un produit de cure devra être mis en place pour éviter la fissuration du béton.
- **Fondation terminée** : le massif devra être revêtu d'un produit d'étanchéité (type revêtement bitumineux)
- **Remblaiement et compactage** : après séchage, l'excavation est remblayée avec une partie des matériaux excavés et compactée de façon à ne laisser dépasser que

la partie haute de l'insert sur lequel viendra se positionner le premier tronçon du mât de l'éolienne. Dans le cas d'une base du mât en béton, cette pièce d'interface se situe en hauteur. La partie superficielle de la fondation est alors lisse. Les fondations seront enterrées sous le niveau du sol naturel. Seule la fondation au niveau de l'embase du mât, d'un diamètre de 6 mètres maximum, sera visible au sol (Fig. II.5). La semelle béton, d'un diamètre de 19 à 23 m et d'environ 3 m de profondeur, est enterrée et non visible [22].



Fig. II.5. Les étapes de fondation sur le sol

#### II.4.3. MONTAGE DES EOLIENNES

Ces travaux nécessitent de pouvoir disposer à l'emplacement de chacune des éoliennes d'une plateforme provisoire de montage, spécifiquement aménagée pour la durée des travaux. La configuration de la plateforme permet la mise en place avant assemblage :

- Des grues de manutention,
- Des camions de livraison,
- Des différents tronçons de mât,
- Des pales,
- Du rotor,

- De la nacelle.

L'installation de l'éolienne est une opération d'assemblage, se déroulant comme suit :

- **Préparation de la tour** : les surfaces et les plateformes de chaque section de la tour doivent être inspectées visuellement et l'intérieur de toutes les sections sont également inspectées avant de les lever à la verticale. On procède ensuite au nettoyage de la tour qui a éventuellement été exposée à la boue et aux poussières lors de son transport. Des tests de tension des boulons sont effectués (Fig. II.6).



Fig. II.6. Préparation de la tour

- **Assemblage de la tour** : cette opération mobilise deux grues pour lever une section de tour en position verticale. Le montage est effectué au moyen d'une grue principale pour les sections du mat, la nacelle, le moyeu et les pales. Une grue secondaire ou "auxiliaire" contrôle et assiste le levage des différents éléments. La section basse de la tour est levée à la position verticale et des poignées aimantées sont utilisées pour amener la tour à sa position. Une fois la section basse placée dans la position adéquate, les boulons de fixation sont serrés (Fig. II.6).



Fig. II.6. Assemblage de la tour

Les sections de tour suivantes sont ensuite assemblées. L'assemblage de la section haute et de la nacelle est en principe planifié le même jour. Toutefois si le

montage de la nacelle ne peut se faire le même jour notamment en raison des conditions climatiques, le risque d'oscillation de la tour est pris en compte et est prévenu en sécurisant la tour grâce à un système de cordes (Fig. II.7).



Fig. II.7 L'ensuite d'assemblage de la tour

- **Préparation de la nacelle** : Quelques outils sont stockés dans la nacelle lorsqu'elle est levée (outils de serrage, câbles, etc...). Les capteurs de vent et le balisage aéronautique sont installés.
- **Hissage de la nacelle sur la tour** : les étriers de levage doivent être fixés solidement à la nacelle dans un premier temps, ainsi que des cordes directrices qui permettront de diriger l'opération. La nacelle est ensuite hissée et fixée sur la tour.

## ***Chapitre III***

### ***Maintenance d'un parc éolien***

#### **INTRODUCTION**

Dans les conditions de fonctionnement, les éoliennes sont sujettes à une détérioration des performances et de la sécurité des machines. A cause de son travail continu et la forte variabilité de la vitesse du vent et des turbulences [40], qui affecte les matériaux et les mécanismes de celle-ci, une surveillance continue est nécessaire pour diagnostiquer les défauts et prendre des mesures pour les travaux de maintenance. Parfois, les éoliennes sont arrêtées pendant les périodes de vent fort pour éviter toute défaillance catastrophique probable. Les éoliennes sont largement touchées par le climat stochastique. Le chargement stochastique ou la contrainte sur les éoliennes peuvent causer des défaillances. La survenance de ces défaillances et ces pannes dans l'équipement de la turbine éolienne provoquent une augmentation dans les coûts des opérations et une perte dans les revenus. La conception et la mise en œuvre d'un plan approprié de maintenance permet de déterminer la meilleure relation entre la maintenance préventive et la maintenance corrective afin de minimiser les coûts opérationnelles, conserver les niveaux acceptables de production d'électricité et optimiser les performances de la ferme éolienne. La maintenance réalisée sur l'ensemble des parcs éoliens, contribue à améliorer la fiabilité des équipements (sécurité des tiers et des biens) et la qualité de la production (en l'absence de panne subie). Cette

---

maintenance préventive se traduit par la définition de plans d'actions et d'interventions sur l'équipement, par le remplacement de certaines pièces en voie de dégradation afin d'en limiter l'usure, par le graissage et le nettoyage régulier de certains ensembles.

Dans ce chapitre, nous fournirons des informations sur la maintenance des parcs éoliens en fonction de l'expérience en ingénierie, elle vise à fournir une stratégie et des solutions possibles pour une maintenance optimale et le maintien de bonnes performances.

### **III.1. TECHNIQUE DE MAINTENANCE D'UN PARC EOLIEN**

#### **III.1.1. PROBLEMES LIES A L'ENERGIE EOLIENNE AUX MILIEUX FROIDS**

Les éoliennes dans les climats froids sont exposées à la glace atmosphérique ou aux basses températures en dehors des limites de conception des éoliennes. Lorsque la température ambiante est inférieure à 0°C et que les gouttelettes de liquide surfondues entrent en collision avec un objet. Ces conditions sont souvent rencontrées en hiver dans les nuages, un phénomène appelé Cloudicing se produit, lorsque la température ambiante descend en dessous de -10 °C. Les nuages de glace causent la plupart des problèmes et défis liés à l'énergie éolienne pour les turbines dépassant les 100 m de hauteur. Un exemple d'éoliennes qui ont été éteintes par des pales rotatives glacées est illustré à la figure III.1. Ainsi, il a été soumis au gel plus fréquemment que les éoliennes plus anciennes et plus petites. La glace peut s'accumuler sur les pales des éoliennes, l'équipement de mesure, la tour et le toit du manteau. D'autres formes de glace dans l'atmosphère sont par exemple la pluie verglaçante, qui provoque une accumulation très rapide de glace et les conséquences peuvent être désastreuses. Les températures doivent être prises en compte lors du dimensionnement des matériaux et composants des éoliennes pour résister aux basses températures, en particulier l'acier, le soudage et les équipements électriques, mais aussi lors de la conception le système de contrôle et le fonctionnement des éoliennes [25].



Fig. III.1. Pales d'éoliennes givrées

#### **III.1.1.1. REDUCTION DE LA PRODUCTION ENERGETIQUE**

Le givrage des éoliennes réduit la quantité d'énergie produite et réduit ainsi les revenus des propriétaires de parcs éoliens. La réduction du rendement énergétique est due à l'accumulation de glace sur les pales des turbines éoliennes, ce qui perturbe ou même détruit les propriétés aérodynamiques sensibles des pales des turbines éoliennes. Au début d'un événement de givrage, la glace commence à augmenter la rugosité de surface sur le bord d'attaque de la lame, ce qui augmente le coefficient de traînée et diminue le coefficient de portance, provoquant ainsi une pénalité aérodynamique. Alors que le givrage continue, la pénalité aérodynamique est encore augmentée et peut même atteindre un niveau où le contrôleur de turbine éolienne décide d'arrêter la turbine en raison d'une production d'énergie trop faible par rapport à la vitesse du vent ou à des niveaux de vibrations trop élevés. Des arrêts de la turbine pourraient également se produire si les capteurs de mesure météorologique, tels que les anémomètres, sont gelés ou qu'ils donnent des valeurs qui n'ont pas de relation avec le réel.

#### **III.1.1.2. RISQUE DE CHUTE DE GLACE ET D'EMISSION SONORE**

L'accumulation de glace sur les éoliennes et en particulier sur les pales de rotor est un danger pour la sécurité qui peut causer des blessures aux humains ou des dommages matériels. Le grand défi est de savoir quand glacer les pales du rotor. Un autre problème de santé et de sécurité est que l'accumulation de glace sur les pales du

---

rotor entraîne une augmentation des émissions sonores en raison de la formation de givre [27]

### **III.1.1.3. AUGMENTATION DE LA CHARGE DE FATIGUE**

L'accumulation de glace sur les pales des éoliennes étant généralement asymétrique, elle crée un déséquilibre entre les pales. Le déséquilibre se produit en raison de modifications de l'aérodynamique avec une augmentation de la masse de la pale due à la formation de glace. Ce déséquilibre provoque des vibrations qui entraînent des changements dans la dynamique de l'éolienne et augmentent ainsi la fatigue sous charge des composants. Cela pourrait augmenter les vibrations de la base de la tour qui sont particulièrement nocifs pour certains types de tours. Le déséquilibre du rotor peut également avoir un effet sur les roulements principaux, le chargement de la base de la tour et d'autres composants qui sont conçus pour résister à une charge plus équilibrée résultant de l'entraînement au vent des pales de rotor [28].

### **III.1.2. PROBLEMES LIES A L'ENERGIE EOLIENNE AUX MILIEUX DESERTIQUE**

Les éoliennes en milieu désertique sont plus sujettes aux pannes, qui réduisent la bonne performance du fonctionnement des parcs éoliens.

#### **III.1.2.1. AUGMENTATION LA TEMPERATURE**

Sur la base des observations dans les milieux désertiques, les éoliennes sont affectées par une température élevée et vent de sables, ce qui réduit les bonnes performances de son fonctionnement. Quand la vitesse du vent est supérieure ou égale à 4 m/s, l'éolienne commence alors à produire automatiquement l'électricité, avec l'augmentation de la température et le vent soufflant à des vitesses extrêmes, le fonctionnement commence à avoir des défis inattendus, en revanche, des mesures de sécurités programmées sont déclenché par l'appareil, cela impose le déclenchement du système de refroidissement, le système de freinage de l'arbre de l'aérogénérateur, ou, des fois, un arrêt complet de la turbine éolienne.

---

## **III.2. PROBLEMES RENCONTRES DANS UN PARC EOLIEN**

### **III.2.1. POUR LE REFROIDISSEMENT DE LA NACELLE**

Il existe un volet d'air qui s'ouvre à une température de 40 °C pour un échange thermique naturel entre l'air extérieur et l'intérieur de la nacelle. Mais comme nous avons observés, cette technique n'a pas empêché le déclenchement

### **III.2.2. POUR LE MULTIPLICATEUR**

Pour le multiplicateur il ya un radiateur air-huile de graissage qui sert à garder la température d'huile inférieure à 80°C et presque le problème est rarement apparais.

### **III.2.3. GROUPE HYDRAULIQUE**

Il ya un radiateur air-huile de pression des systèmes pitch et pour garder la température d'huile inférieure à une température adéquate [18].

## **III.3. L'EROSION**

Phénomène de l'érosion Parmi les problèmes que les éoliennes au milieu du désert ont sur les performances de l'éolienne dans son ensemble, il est clair que l'une des caractéristiques les plus importantes de la pale de l'éolienne est sa performance aérodynamique. Si une usure du bord d'attaque se produit, elle pourrait constituer une menace pour ces performances aérodynamiques en raison de la rugosité de la surface de la pale, ce qui provoque de gros dégâts qui arrêtent les éoliennes et ne peuvent être corrigés que par un remplacement (Fig. III.2). où la rugosité de la surface des pales joue un rôle vital dans la séparation de l'écoulement ou la transition de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent, la perte annuelle de production d'électricité peut atteindre jusqu'à 20 % en raison de l'usure selon les dernières recherches [29].



Fig. III.2. Érosion du bord d'attaque

### **III.4. MAINTENANCE D'UN PARC EOLIEN**

#### **III.4.1. DEFINITION LA MAINTENANCE DU PARC EOLIEN**

C'est une des opérations techniques visant à maintenir ou rétablir une éolienne dans un état de référence lui permettant d'accomplir sa fonction requise, elle consiste à contrôler à échéances régulières les éléments du parc pour optimiser leur disponibilité.

#### **III.4.2. TYPE DE MAINTENANCE**

La maintenance peut être curative ou préventive. Elle concerne tous les éléments de l'éolienne.

##### **III.4.2.1. MAINTENANCE PREVENTIVES**

Les maintenances préventives, garantes du bon fonctionnement des machines à long terme, se décomposent en 4 phases et sont effectuées à tour de rôle chaque trimestre qui suit la mise en service (Fig. III.4) [32].

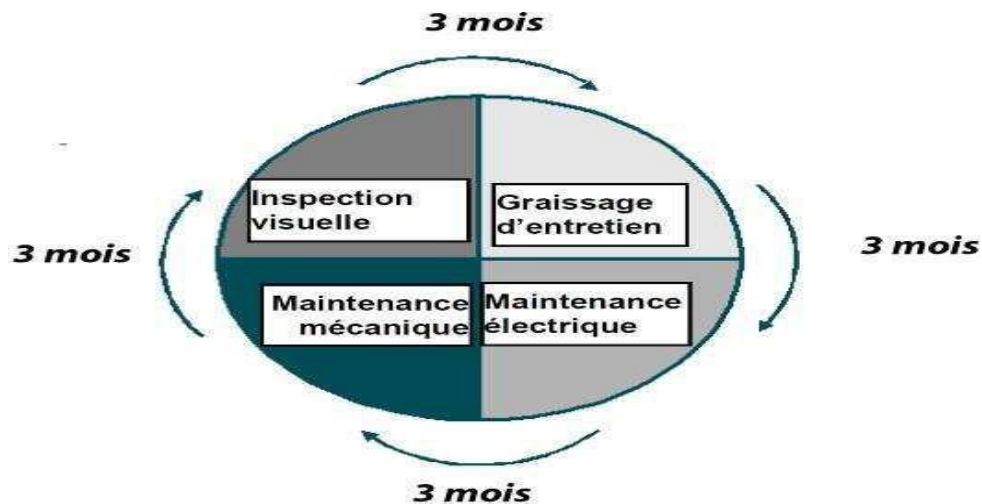


Fig. III.4. Phases de maintenance

#### III.4.2.1.1. INSPECTION VISUELLE

Lors des inspections visuelles, les points particuliers de vigilance sont axés sur les aspects suivants :

- Corrosion,
- Dommages mécaniques (par ex. fissures, déformation, écaillage, câbles usés),
- Fuites (huile, eau),
- Unités incomplètes,
- Encrassements/corps étrangers.

Ces opérations d'inspections sont faites au moins une fois par an [32].

#### III.4.2.1.2. GRAISSAGE D'ENTRETIEN

Les opérations de graissage visent à s'assurer du bon état des pièces mobiles et d'assurer un appoint ou de vidanger les huiles et lubrifiants. L'ensemble des points à vérifier est précisé dans le plan de maintenance relatif au graissage défini pour chaque modèle [32].

#### III.4.2.1.3. MAINTENANCE ELECTRIQUE

Les opérations de maintenance électrique visent à s'assurer du bon fonctionnement de tous les équipements électrique actifs (transformateurs, éclairage,

---

mises à jour logiciels,...) et passifs (mises à la terre,...). L'ensemble des points à vérifier est précisé dans le plan de maintenance électrique défini pour chaque modèle [32].

#### **III.4.2.1.4. MAINTENANCE MECANIQUE**

Lors des opérations de maintenance mécanique, les points particuliers de vigilance sont axés sur les aspects suivants :

- Panneaux d'avertissement ;
- Pied du mât/local des armoires électriques ;
- Fondations ;
- Mât : échelle de secours, ascenseurs de service, plateformes et accessoires, chemin et fixation de câbles, assemblages à vis ;
- Nacelle : treuil à chaîne, extincteurs et trousse de secours, système de ventilation, câbles, trappes, support principal, arbre de moyeu, transmissions d'orientation, contrôle d'orientation, couronne d'orientation, entrefer du générateur, groupe hydraulique, frein électromécanique, dispositif de blocage du rotor, assemblages à vis... ;
- Tête du rotor : rotor, câbles et lignes, générateur, moyeu du rotor et adaptateur de pale,
- Engrenage de réglage des pales, système de graissage centralisé, vis des pales du
- rotor, pales de rotor... ;
- Système parafoudre ;
- Anémomètre

#### **III.4.2.1.5. MAINTENANCE DES 300 HEURES**

La première maintenance après la mise en service a lieu après 300 heures. Au cours de cette opération, l'intégralité des opérations de maintenance précédemment mentionnées est effectuée.

Chaque éolienne dispose d'un carnet de maintenance dans lequel sont consignées les différentes opérations réalisées. De plus, une inspection visuelle de l'état général de l'éolienne est effectuée lors de chaque opération de maintenance. Ces opérations de maintenance garantissent le suivi et la durabilité des éoliennes dans le temps. [32]

### III.4.2.2. MAINTENANCE CORRECTIVE

Elle se définit comme un type de maintenance faite après un diagnostic de panne et dont le but est de remettre un équipement en état de fonctionnement. C'est une stratégie qui se traduit par un avantage certain relatif à l'utilisation maximale des composants de l'éolienne ; en effet, les équipements ne sont remplacés ou réparés qu'en cas de panne. Aussi appelée la stratégie, elle est souvent utilisée à la suite d'une panne entraînant un arrêt de l'équipement. Or, c'est pendant cette période de vent fort que l'éolienne se doit d'être disponible à la production. L'arrêt de l'éolienne pendant la durée de maintenance corrective entraîne une perte de production conséquente. L'unique avantage d'une maintenance corrective est qu'elle permet d'utiliser l'équipement jusqu'à épuisement. [33] ses actions s'effectuent par étapes, dans l'ordre suivant [4] :

- Test : comparaison des mesures avec une référence,
- Détection : déceler l'apparition d'une défaillance,
- Localisation : les éléments par lesquels la défaillance se manifeste,
- Diagnostic : analyse des causes de la défaillance,
- Dépannage et réparation : remise en état (avec ou sans modification),
- Contrôle : contrôle du bon fonctionnement,
- Amélioration éventuelle : éviter la réapparition de la panne,
- Historique : mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

### III.4.2.3. MAINTENANCE PREDICTIVE

Elle est basée sur l'analyse de l'état de l'éolienne. L'identification de certains signes précurseurs est primordiale dans ce type de maintenance. Dans le domaine éolien, différents critères peuvent être analysés:

- **L'analyse des huiles** : les éoliennes sont des machines tournantes qui ont de forts besoins en lubrification. L'analyse des huiles permet de détecter des anomalies telles que l'usure par abrasion, la contamination par des particules internes ou externes à l'éolienne.
- **L'analyse vibratoire** : les contraintes mécaniques que subissent les pièces rotatives des éoliennes sont étudiées avec précision afin de prévenir de tout risque et tout arrêt de la production d'énergie. Cela va permettre par exemple de prévenir l'exploitant de

graves pannes dues aux déséquilibres des lignes d'arbres, à la dégradation des accouplements ou encore aux usures des roulements.

• **La thermographie** : en utilisant cette méthode, on peut identifier les sources d'énergie infrarouge émises par l'éolienne, effectuer des analyses sans arrêter la machine et à distance, détecter par exemple une surchauffe anormale des éléments mécaniques ou électriques [32].

### III.5. MAINTENANCE LES COMPOSANT D'EOLIEN

#### III.5.1. MAINTENANCE LES PALES

Les pales sont composées de plusieurs matériaux avec des propriétés différentes pour répondre à des besoins spécifiques de l'équipement. La composition varie entre les différents manufacturiers et les modèles sur le marché. Il existe donc une grande variabilité à la source même des volumes. Néanmoins, les mêmes éléments reviennent généralement. Le tableau III.1 dresse un portrait des matériaux utilisés pour chacune des sections d'une pale d'éolienne. La numération du tableau III.1 se rapporte à la figure III.5 qui montre une coupe transversale de l'intérieur d'une pale et le positionnement des composantes dans la structure [34].

Tableau III .1.Composition d'une pale éolienne

#	Catégories	Exemple de matériaux
1	Fibre de renforcement	Fibre de verre ou fibre de carbone
	Matrice polymère	Résine thermodurcissable : époxy, polyester, polyuréthane ou thermoplastique
2	Couche de revêtement	Polyéthylène ou polyuréthane
3	Noyau en sandwich	Bois balsa ou mousse (chlorure de polyvinyle, polyéthylène téréphtalate, etc.)
4	Métaux	Acier pour les boulons, cuivre pour le filage, etc.

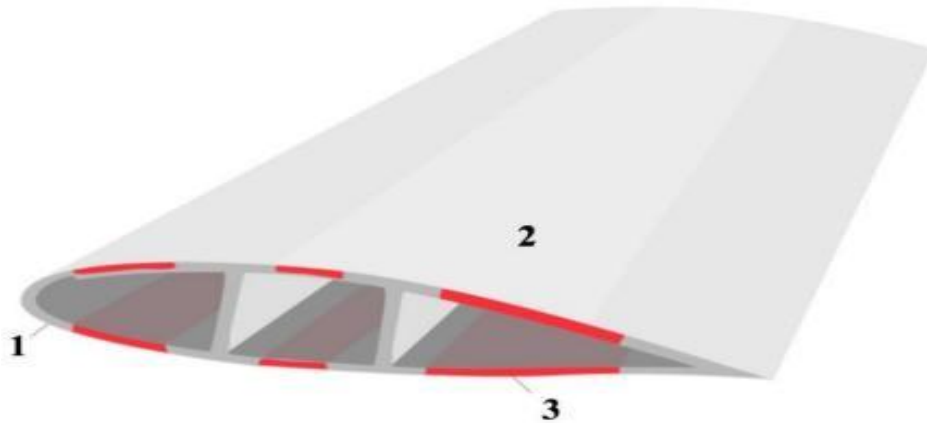


Fig. III.5. Coupe transversale de l'intérieur d'une pale

Un composite est constitué de fibres et d'une matrice polymère, la fibre de verre compose 75 % de la masse de ses pales et la résine polyester, 17 %. C'est-à-dire que la masse est constituée à 92 % de matériaux composites. Le problème avec les matériaux Thermodurcissables est que le processus qu'ils subissent est irréversible et rend le recyclage très compliqué. En revanche, ces matériaux Représentent plusieurs avantages pour l'industrie, comme un faible coût de fabrication, une faible densité, la résistance à la corrosion et l'absence de conductivité thermique et électrique [34].

### III.5.1.2. DESCRIPTION DES DYSFONCTIONNEMENTS ET DES CAUSES D'ENDOMMAGEMENT DES PALES

Certaines des principales causes d'endommagement de la lame comprennent les défauts de fabrication, les dommages de transmission, les dommages d'assemblage, les dommages de montage, la foudre, la corrosion environnementale, la pluie, le sable, les contaminants corrosifs, les impacts d'oiseaux, les vélos thermiques, l'usure des bords avant et arrière, la fatigue et l'humidité. Pénétration et impact de corps étrangers, sortie d'humidité à travers la structure stratifiée de la peau, à la suite de dommages superficiels, défaillance mécanique. 3800 pannes de pales chaque année.

Les dommages aux pales d'éoliennes peuvent être classés en usure de surface, rugosité, dommages non structurels, fissures de surface, petites déformations et dommages structurels (avec défaillance des fibres). Ces dommages nécessitent différents types de réparation [34].

### III.5.1.3. FLAMBAGE DYNAMIQUE (LOCAL)

Au cours de la rotation de la pale, les faces extrados et intrados sont sollicitées par des charges répétées et variables, engendrant ainsi des contraintes alternées en traction et en compression. La face soumise aux contraintes de compression est susceptible au flambage local. Une étude pourra être alors effectuée sur un tronçon de la pale qui Représente la zone la plus sollicitée. [35]

### III.5.1.4. FATIGUE DES PALES D'EOLIENNE

Lors de son service, la pale est sujette à des problèmes de variation de contraintes d'un cycle à un autre. Cette variation peut avoir pour conséquence une dégradation de la résistance structurale à travers les phénomènes d'accumulation de contraintes et de fatigue. Cependant, un certain nombre d'échantillons (tronçons) doit être réalisé conformément aux principes de construction de la pale. Ces échantillons seront ensuite testés à un niveau suffisant jusqu'à Rupture sous un chargement alterné. Un banc d'essai et des jauges de déformation pour effectuer de tels essais sont nécessaires. Les résultats expérimentaux obtenus permettront de chiffrer la durée de vie de la pale avec un degré de confiance suffisamment admissible. En moyenne, cette durée de vie est estimée à 20 ans. La durée de vie en fatigue caractérisée par le nombre de cycles à la rupture  $N_f$  de l'échantillon est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \alpha(2N_f)^b + \beta(2N_f)^c \quad (\text{III.1})$$

Avec :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $b$  et  $c$  paramètres déterminés par l'expérience;

$\varepsilon_e$ ,  $\varepsilon_p$  et  $\varepsilon_t$  déformations élastiques, plastiques et totales.

Alors il nécessaire de bien comprendre les mécanismes d'endommagement en fatigue, et de savoir comment prendre en compte au mieux les différents facteurs dont dépend la fatigue des matériaux composites (la nature des fibres et des résines, du drapage, de la qualité des interfaces...) [35]

### III.5.1.5. L'ENTRETIEN DE PALES

L'entretien est effectué pour deux types de la pale

- **L'entretien** corrective : généralement effectué par des revêtements, des rubans, des écrans (corrosion), des réparations cosmétiques, des charges et des joints, des injections de résine pour les petites fissures ou fissures de surface, des réparations de scellant/patch et des écharpes pour les structures endommagées
- **L'entretien** corrective : remplacement des pales par d'autres [36].

### III.5.2. MAINTENANCE LA NACELLE

#### III.5.2.1. DESCRIPTION LA NACELLE

La nacelle des éoliennes constitue le cœur de la turbine, la nacelle est constituée d'une structure métallique habillée de panneaux composites en fibre de verre. Les éléments principaux sont disposés sur un châssis en acier [37]. La nacelle contient :

- La chaîne cinématique,
- La génératrice (qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique)
- Le transformateur (ce convertisseur de puissance peut dans certains cas être localisé en pied de mât).

La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Les parties essentielles constituant la nacelle sont comme suit :

- **Arbre lent** : Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin
- **Multiplicateur de vitesse** : Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne.
- **Le système de refroidissement**: Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe certains types d'éoliennes comportant un refroidisseur à l'eau.
- **La génératrice** : La génératrice constitue l'élément assurant la conversion d'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de différents types de machines (généralement asynchrones).

- Anémomètre C'est un dispositif de mesure de la vitesse du vent ; ayant la possibilité d'émettre des signaux électriques qui seront utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne afin de la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique assure la protection de l'éolienne en provoquant un arrêt automatique si la vitesse du vent dépasse 25m/s.
- **Le système de contrôle-commande** : Il permet un contrôle du dispositif éolien. En cas de danger, à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne [37].

### III.5.2.2. L'ENTRETIEN DE LA NACELLE

L'entretien de la nacelle dépend de deux types : l'entretien interne et l'entretien externe

**l'entretien interne** : c'est la maintenance préventive des éléments suivants :

- **le moyeu** :
  - Examen virtuel de la plume et vérification de l'absence de fissures ou de coups.
  - L'incantation sur les vis fixant la plume au moyeu.
  - Lubrification des roulements de badminton
  - Examen virtuel du nombril et vérification de l'absence de fissures.
  - Estampage sur 20% des boulons d'ancrage- Assurez-vous qu'il n'y a pas de fissures dans le couvercle et qu'il est bien attaché au paquet.
- **arbre à vitesse lente** :
  - Incantation sur les chaises portantes.
  - Gravure sur les vis internes entre celui-ci et la boîte de vitesses.
- **bagues collectrices** :- Il est nettoyé pendant que le rotor tourne lentement.- Changez les balais de charbon en fonction de la zone de contact avec la bague collectrice
- **la boîte de vitesse** :
  - Détecter le niveau d'huile et s'assurer qu'il n'y a pas de fuite.
  - Détection des dents d'engrenage et vidange d'huile si nécessaire.
  - Lubrification du roulement avant de la boîte de vitesses
  - Gravure sur les vis de fixation du réducteur à la nacelle.

- 
- Alimenter la boîte de vitesses en huile en cas de besoin grâce à la jauge à huile
  - **Les freins :**
    - S'assurer de l'épaisseur (épaisseur) de la garniture de frein.
    - Inspectez soigneusement le disque de frein et assurez-vous qu'il n'y a pas de fissures.
    - Vérifier l'entrefer entre les plaquettes de frein et le disque.
    - Vérifier les différentes positions des capteurs de freinage.
    - Assurez-vous que les câbles l'atteignent.
    - Huilez les freins si nécessaire.
    - Test des soupapes responsables des freins.
  - **L'arbre lent :**
    - S'assurer de l'intégrité du joint flexible, noter s'il présente des fissures ou non, et le fixer avec la clé dynamométrique.
    - **Le générateur:**
      - Éclisses sur les bornes de raccordement des câbles.
      - Poinçonnage sur les vis reliant le générateur à la base.
      - Lubrification des roulements avant et arrière du générateur.
      - Tester et nettoyer le ventilateur pour refroidir le générateur.
      - L'indentation sur les vis fixant la base au châssis,
      - Assurez-vous que les extrémités du générateur sont connectées à la rosette.
      - Assurez-vous que le capteur de température est connecté [37].

#### **b) l'entretien externe :**

le même surveillance de les pales par des revêtements, des rubans, des écrans (corrosion), des réparations cosmétiques, des charges et des joints, des injections de résine pour les petites fissures ou fissures de surface, des réparations de scellant/patch et des écharpes pour les structures endommagées.

### **III.5.3. MAINTENANCE LE MAT**

#### **III.5.3.1. DESCRIPTION LE MAT**

Le mât, qui est un élément vertical rigide, majoritairement constitué de fibres de polyester ou d'acier, est la partie qui sert de liaison entre la partie supérieure de la tête et des pales de l'éolienne et la partie inférieure du système d'inclinaison hydraulique du

---

mât, facilitant l'installation et la maintenance. Le mât permet à la machine de prendre de la hauteur pour mieux capter le vent et en tirer le maximum [38].

### III.5.3.2. L'ENTRETIEN DE LE MAT

L'entretien est principalement effectué par des inspections visuelles et des travaux d'enquête, car les modes de défaillance potentiels sont la fatigue, les fissures et la corrosion. L'entretien des fondations et des structures sous-marines comprend des réparations de peinture, l'élimination de la prolifération marine et le placement de roches pour mieux atténuer les risques de nettoyage des fondations et de réparations accidentelles aux dommages. Installations de la tour Les vagues sont comme des échelles, des portes, des filets et des plates-formes. Les travaux suivants sont également réalisés [38].

- Vérification les points de soudure de l'échelle avec la tour.
- Renforcement sur 31 % des boulons de base du centre et du bas de la tour pour la tour tubulaire
- Tester la résistance et la rigidité des câbles en s'assurant qu'il n'y a pas de fissures.
- Assurer la sécurité des tâches d'ascension de la turbine, comme exemples des ceintures de sécurité.
- Assurez-vous que les points de soudure sont fixes par rapport à la tour grillagée.

## III.6. STRATEGIES D'OPTIMISATION DE L MAINTENANCE

Les services d'exploitant appliquent différentes stratégies pour maximiser l'utilisation des équipements Ces stratégies concernent la gestion des pièces ou des modes de prises en charge des interventions [33].

### III.6.1. GESTION DES PIECES DANS LE CADRE DE LA MAINTENANCE

La gestion des rechanges de pièces sur les parcs est liée à la politique de gestion des stocks de l'exploitant. On distingue :

- Les remplacements programmés : ce sont les rechanges systématiques d'un composant après un certain temps d'utilisation. Ils sont issus des maintenances préventives. L'exploitant doit donc disposer de ces pièces aussi souvent que

possible.

- Les remplacements non programmés : ils interviennent pour des remplacements de pièces souvent pour des opérations correctives.
- Les rechanges pour remplacements exceptionnels qui sont liés aux pièces :
  - Dont les cycles d'approvisionnement sont longs
  - Qui présentent la même durée de vie équivalente à celle de l'équipement
  - Dont les prix d'achat sont élevés.

On distingue les remplacements basés sur l'âge du composant. Ce modèle prévoit le remplacement des pièces au bout d'une durée  $T$  établie en fonction du constructeur et du retour d'expérience de l'exploitant. Le choix de remplacement se fait sur une durée de fonctionnement qui maximiserait l'utilisation de l'équipement. On distingue aussi la maintenance par l'utilisation de modèles conditionnels : ce modèle privilégie la maintenance prédictive à l'aide de moyens d'analyse. Les décisions de maintenance dépendent du niveau de dégradation du système (observé par les différents techniciens ou signalé par les capteurs). L'avantage est qu'il aide à limiter les remises en état inutiles et les interventions correctives. Ce type de maintenance passe par la connaissance du processus de dégradation des composants de l'éolienne [33].

### **III.7. MUTUALISATION DU TYPE DE MAINTENANCE ET STRATEGIES OPPORTUNISTES**

La mutualisation des interventions : Il s'agit de regrouper les équipements qui nécessitent le même type de maintenance. Cette approche permet de réaliser plusieurs interventions de maintenance au même moment pour maximiser la disponibilité. Concernant la stratégie opportuniste de prise en charge appliquée dans l'optique de maximiser la disponibilité des éoliennes, elle est basée sur la prise en compte des circonstances pour réaliser d'autres opérations de maintenance qui n'étaient pas prévues à ce moment :

- L'opportunité liée à une intervention en cours : qui consiste à réaliser plusieurs opérations en une seule. La perte de production est mutualisée sur plusieurs opérations. Par conséquent, elle est globalement réduite comparée à sa valeur si

les interventions avaient été effectuées distinctivement.

- L'opportunité d'une opération grâce aux conditions météorologiques [33].

### III.8. COÛTS DE LA MAINTENANCE

Les coûts de la maintenance représenter du coût total de l'énergie produite d'un projet éolien, en fait, la relation qui lie le prix de l'énergie éolienne et de maintenance est la suivante [30] :

$$PEE = \left[ \frac{CI + TCS + CR}{(PAE)} \right] + C \quad (III.2)$$

CI : Capital initial (\$)

PEE : prix de l'énergie éolienne (\$/kWh)

TCF : Taux de charge fixe (%/an)

Cr : Coûts de remplacements (\$/an)

PAE : production annuelle d'énergie (kWh/an)

CM : coûts de maintenance (\$/kWh)

Étant donné qu'il existe une incertitude importante dans les coûts futurs d'exploitation et d'entretien des parcs éoliens lorsque les projets sont financés, les sensibilités sont souvent effectuées sur les coûts d'exploitation et de maintenance. La différence entre les estimations faibles et élevées typiques peut avoir une incidence sur le prix de l'énergie éolienne et le retour sur investissement après impôt d'environ 10 %. À l'heure actuelle, les avantages fiscaux associés à l'énergie éolienne contribuent de manière significative à l'économie d'un projet. À mesure que ces avantages se réduiront au fil du temps, l'importance de l'incertitude dans la maintenance augmentera. Par exemple, bien que la différence entre les estimations faible et élevée ait une incidence après le rendement fiscal d'environ 10 %, elle influe sur les rendements avant impôt de l'ordre de 20 %. Ainsi, l'incertitude dans les coûts de maintenance deviendra plus importante pour l'industrie à mesure que les crédits d'impôt à la disposition de l'industrie commerciale diminuent.

---

### **III.9.1. REDUIRE LES COUTS DE MAINTENANCE**

#### **III.9.1.1. IDENTIFIER LES COMPOSANTS CRITIQUES**

La conception, la construction ou la fabrication, l'entretien et la surveillance des composants critiques, pour la sécurité, Dans la majorité des systèmes complexes, certains composants sont considérés comme des éléments critiques, l'identification de ces éléments permet au personnel de maintenance de diriger ses activités de surveillance, d'inventaire et de logistique. Bien que dans une certaine mesure les composants critiques dépendent du fabricant, de la configuration et de l'environnement d'exploitation, certains composants (boîtes de vitesses, générateurs et convertisseurs...) sont bien connus dans toute l'industrie comme étant critiques [31].

#### **III.9.1.2. CARACTERISER LES MODES DE DEFAILLANCE**

S'appuyant sur des analyses et des conclusions, la compréhension de l'état de défaillance permet au personnel de maintenance de concentrer ses efforts pour surveiller, prévoir ou prévenir les défaillances ou les défaillances des composants. Le court-circuit de l'alternateur peut être difficile à prévoir, mais de nombreuses études se sont concentrées sur les roulements de boîte de vitesses ou l'usure des engrenages qui peuvent être détectés tôt avec une bonne surveillance du lubrifiant ou des vibrations du moteur. Comprendre comment l'échec progresse est essentiel pour s'assurer que les gens évitent les dommages causés par une défaillance imprévue. [31]

#### **III.9.1.3. IDENTIFICATIONS DES CAUSES PRINCIPALES**

Le diagnostic des causes de défaillance est mis en place suite à la détection d'un problème sur tout type de composant, que ce soit lorsqu'il est en service ou bien lors de sa fabrication. Bien que l'exploitant du parc éolien puisse s'intéresser principalement au remplacement d'un composant défectueux et à la remise en service de la machine, une défaillance représente toujours une occasion pour identifier les causes et par la suite améliorer le produit ainsi que la stratégie de maintenance. La plupart des fabricants d'éoliennes incluent l'analyse des défaillances comme une partie essentielle de leur processus continu d'amélioration de la qualité. L'évaluation de la cause principale d'une certaine défaillance de composants majeurs est essentielle pour déterminer si la

---

défaillance est due à la qualité du produit, à une application incorrecte de ce produit, à une erreur de conception ou à des hypothèses de conception inappropriées. Dans ce cas, et une fois les causes de défaillances des composants critiques sont identifiées, des corrections seront nécessaires et un plan de remplacement sur le terrain sera élaboré [31].

#### **III.9.1.4. ÉLABORATION D'UN PLAN DE LOGISTIQUE**

la planification logistique détermine les méthodes et la fréquence de contrôle des opérations aux orientations stratégiques, où le plan logistique complet permet au personnel de maintenance de traiter avec efficacité les problèmes de défaillance lorsqu'elles arrivent et de minimiser les temps d'arrêt des éoliennes. Au minimum, un plan logistique permettra d'identifier les événements majeurs de défaillance et d'énumérer les tâches requises pour effectuer une réparation. Un plan complet anticipe les défaillances probables et prépare un inventaire des pièces de rechange, de la main-d'œuvre et de l'équipement. [31]

#### **III.9.1.5. AMELIORER LA MAINTENABILITE**

La maintenabilité se réfère à la facilité et l'efficacité de l'exécution des tâches associées à la maintenance des éoliennes, y compris le service de réparations non planifiées. Le personnel d'entretien est très bon à trouver des moyens efficaces pour exécuter des tâches de routine, et a souvent une compréhension de l'équipement qui ne peut être acquise que par de l'expérience pratique. Leurs suggestions et commentaires devraient être systématiquement inclus dans le processus d'amélioration continue [31].

#### **III.9.1.6. IMPLANTER DES SYSTEMES DE SURVEILLANCE**

Actuellement, le domaine de la surveillance occupe une place centrale pour élaborer et optimiser la structure de décision d'une politique de maintenance, où La surveillance des conditions lors du fonctionnement des éoliennes est un élément essentiel dans une stratégie de maintenance efficace. 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 et avertit le personnel d'entretien des conséquences qui peuvent se développer en bris ou en défaillances critiques. Ces informations peuvent être utilisées pour planifier des tâches

de maintenance prédictive avant que le problème ne s'aggrave et entraîne un temps d'arrêt qui résulte un manque de productivité et une perte de revenus. Dans certains cas, des mesures correctives peuvent être envisagées pour atténuer le problème. Un exemple est le filtrage de l'huile de boîte de vitesses si la surveillance indique des niveaux de contamination élevés. Dans d'autres cas, comme l'indication d'une fissure structurelle, des mesures peuvent être mises en œuvre pour suivre la progression du problème. Dans le pire des cas de défaillance majeure imminente, la surveillance des conditions peut aider le personnel de maintenance à planifier la logistique afin d'optimiser la main-d'œuvre et l'utilisation de l'équipement et de minimiser le coût des réparations. [31]

## **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce projet de fin d'études nous a permis de faire une étude sur la maintenance des parcs éoliens. Afin de maintenir une production régulière de l'énergie éolienne, il est nécessaire d'assurer que l'installation éolienne fonctionne de façon permanente et à long terme. Pour atteindre cet objectif, une équipe qui applique les techniques optimales de maintenance est toujours disponible à ce service au sein du parc éolien. Le sujet de maintenance d'un parc éolien abordé dans notre projet, est divisée en deux types selon la nature du site installé, les conditions météorologiques et les caractéristiques des aérogénérateurs installés:

- Maintenance préventive pour détecter les éventuelles pannes
- Maintenance curative pour réparer les pannes produites

Comme perspective et suite de ce travail, une telle étude sur l'amélioration de la maintenance des pales d'une éolienne pour diminuer les charges imposées par la turbulence peut être proposée afin de permettre d'éviter les ruptures de production d'énergie.

## Références

- [1] Alain Boulenger, aide mémoire maintenance conditionnelle, France, 2008.
- [2] Introduction à la maintenance chapitre 1 : « approche de la maintenance industrielle », Iset Nabeul 2013-2014, p1.
- [3] Berrichi. A, « La gestion à deux niveaux avec optimisation de la production et de la maintenance sous diverses contraintes : cas mono et multicritère », Thèse de doctorat de l'université Muhamed Bouguara de Boumerdès (UMBB), Algérie, 2009
- [4] J-C Perrot. Maintenance préventive dans les ateliers d'usinage. France.1995
- [5] Ly F., Simeu-Abazi Z., Leger J-B. *“Terminologie Maintenance : bilan Groupe de Recherche S.P.S.F., Institut pour la Maîtrise des Risques”*, Grenoble, 1999
- [6] H. Zeggane. Cour de technique de maintenance master2 tech de production industrielle University M. Boudiaf 2021.
- [7] <http://christian.hohmann.free.fr/index.php/portail-maintenance-productive/les-basiquesde-la-maintenance-productive/511-la-courbe-en-baignoire>
- [8] L. LAURENS Jérémy. Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique. Thèse présentée pour l'obtention du titre de docteur en pharmacie diplôme d'état 16 Février 2011
- [9]Arsslen. Cour de conduit de projet. Master 2. tech de production Université de M'sila.
- [10] M. Nasser Eddine, « Algorithmes de construction de graphes dans les problèmes d'ordonnement d'un projet », thèse Doctorat en science université Ferhat Abbas Sétif, 2011, p42.
- [11] Charif Mohamed Elamine. Planification d'un projet de maintenance, apport des techniques d'ordonnement MEMOIRE master 2015/2016
- [12]<http://www.logistiqueconseil.org/Articles/Logistique/Methode-gantt.htm>
- [13] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme\\_de\\_Gantt](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Gantt)

[14] Introduction à la maintenance chapitre 3 : « organisation du service maintenance », Iset Nabeul, 2013-2014, p24-25.

[15] Guide méthodologique relatif à l'implantation des éoliennes en Seine-et-Marne mars 2007

[16] Livre Tarik al- Shemmeri / Wind Turbines/© 2014 T. Al- Shemmeri & bookboon.com ISBN 978-87-7681 692-6

[17] houcinat, Mme. *cours energie eolienne*. BLIDA : econle technique de sonelgaz blida, 2013. 4.

[18] II.3.2 Analyse de gisement énergétique du vent, LAHBIB MEBAREK / BILLAH MOHAMMED Etude de performance d'une éolienne dans un milieu saharien en particulier station éolienne de Kabertene/ 30 mai 2016/ UNIV ADRAR

[19] T. Senju, N. Nakasone, A. Yona, A. Saber, T. Funabashi, H. Sekine, <<Operation strategies for stability of gearless wind power generation systems>>, IEEE conference, Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21century, pp 1-7,2008.

[20] Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2009 – 41 "Dimensionnement d'une installation éolienne et modélisation informatique d'une pale d'éolienne"

[21] 33.spebh etude de danger Chapitre IV. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

[22] ETUDE D'IMPACT – SEPE « La Longe » – Projet d'implantation d'un parc éolien - commune de Saint-Sornin-Leulac (87)ETUDE D'IMPACT – SEPE « La Longe » – Projet d'implanta

[23] <http://www.leseoliennes.be/politique/windmilldefects.htm>

[24] M. SAHNOUN, D. BAUDRY A. LOUIS, B. MAZARI / Modélisation d'un plan de maintenance basé sur les systèmes multi-agents pour les éoliennes offshore /Conference Paper· Novembre 2014/ France

[25] Mémoire /DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE PRONOSTIC POUR LES ROULEMENTS DES ÉOLIENNES/ HAYOUNI JIHED /Octobre 2017 UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

- [26] Said, Z., Mansour, R., Seyfeddine, G., & Mehdizadeh, M. (2019). Configuration of wind farm in Kaberten region: wind potential and optimal capacity. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1-7.
- [27] T. Lutz, B. Arnold, D. Bekiropoulos, J. Illg, E. Krämer, A. Wolf, *et al.*, "Prediction of flowinduced noise sources of wind turbines and application examples," *International Journal of Aeroacoustics*, vol. 14, pp. 675-714, 2015.
- [28] V. Lehtomäki, K. Sandel, W. Moser, S. Rissanen, and M. Wadham Gagnon, "Input to new IEC 61400–1 design standards: two case studies of iced turbine load analysis," in *Proceedings of Winterwind 2014 Conference*, 2014.
- [29] *Ahmida Rezig*<sup>1,\*</sup>, *Ahmed Yousfi*<sup>1</sup>, *Sylvain Fréour*<sup>2</sup>, *Frédéric Jacquemin*<sup>2</sup>/  
Effet de l'érosion par des particules de sable sur la performance des pales d'éoliennes dans les zones arides et semi-arides
- [30] C. A. Walford, *Wind turbine reliability: understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs*: United States. Department of Energy, 2006.
- [31] C. A. Walford, "Wind turbine reliability: understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs," Sandia National Laboratories 2006.
- [32] Zergane, S., & Smaili, A. (2011). Optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs dans un parc éolien. *Revue des énergies renouvelables*, 14(4), 727-732.
- [33] Miguel Kpakpo. Une approche de gestion de la maintenance de parcs éoliens centrée sur les systèmes multiagents. Intelligence artificielle [cs.AI]. Normandie Université, 2018. Français. ffNNT : 2018NORMIR33ff. fftel-02173351f
- [34] Zergane, S., & Smaili, A. (2021). Effect of Turbulence on Wind Turbine Farm Power Production. In *Advances in Green Energies and Materials Technology* (pp. 393-400). Springer, Singapore.
- [35] Document Eco-conception et développement des pales d'éoliennes en matériaux composites/ Brahim Attaf / Expert en Structure Composites, Région PACA, France

[36] Zergane, S., Amroune, S., Rokbi, M., & Guesmia, S. (2022). New study on the extension of a current wind farm; case of Kaberten park in Algeria. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT), 13(2), 428-434.

[37] : A.Saki, M.Belaidi, « Etude d'un générateur asynchrone dans la production d'énergie éolienne » ; mémoire d'ingénieur ; ENP 2006.

[38] These .sayed-mansour. L'énergie éolienne et ses diverses applications : exploitation, maintenance et installation d'éoliennes Journal .Maria Martinez Luengo/ Failure Mode Identification and End of Life Scenarios of Offshore Wind Turbines: A Review/ Academic Editor: Frede Blaabjerg/ 7 August 2015

[39] Miguel Kpakpo. Une approche de gestion de la maintenance de parcs éoliens centrée sur les systèmes multiagents. Intelligence artificielle [cs.AI]. Normandie Université, 2018. Français. NNT : 2018NORMIR33 . tel-02173351

[41]<https://forums.futura-sciences.com/physique/266564-rendement-dune-eolienne.html>

[40]<https://particuliers.alpiq.fr/guide-energie/energie-renouvelable/rendement-dune-eolienne>

[42]FEYROUZ MESSAI, « Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable », Thèse de magister en Electrotechnique, soutenu 2009.