



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologies

Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Maintenance en Instrumentation Industrielle

Thème

**CONCEPTION D'UN PLAN DE MAINTENANCE
POUR UN PARC EOLIEN**

Presenté Par :

Mr.SEGMANE AZEDDINE

Mr. MAICHE MOHAMED FATEH

Jury :

Dr. TOUAFEK Khaled

.....

.....

Maître de recherche A

Maître Assistant A

Maître Assistant A

URAER. Ghardaïa

Univ. Ghardaïa

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Examineur

Examineur

Année universitaire 2013/2014

Remerciements

Je remercie mon encadreur Mr le professeur KHALED TOUAFEK pour ses conseils et pour m'avoir honoré en acceptant de diriger ce travail.

Je remercie aussi toutes les personnes et associations qui, d'une quelconque manière, m'ont apporté leur amitié, leur attention, leurs encouragements, leur appui et leur assistance pour que je puisse mener à terme ce travail.

Je remercie également Mr le professeur BATOUNE BACHIR pour leur disponibilité permanente.

Pour finir, j'adresse mes remerciements aux membres du jury et l'université de Ghardaïa, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

A tous ceux qui me sont chers et proches, à tous ceux qui ont semé en moi à tout point de vue.

A mes chers parents et à toute ma famille et mes ami(e)s que le destin a arrachés à la vie.

A tous ceux qui (re) connaissent la valeur des études et de travail.

SEGMANE Azeddine

DEDICACES

A la mémoire de mon père

A la mémoire de ma mère

A ma très chère sœur

A mes beaux parents

A mes cousins

A ma tante toumi kheira

A mes ami (e)s : HAIBA MOSAAB, BELKHANNOUSS CHAKIB, TAIFOUR
TOUFIK, FENNICH KHADIDJA, BELLOUDINA KACEM, BAADCHIA MOHAMED
,BAADCHIA ILYES,MEKI MOSTAPHA,BEN ABD ERRAHMAN SABRIE,kayhol
mokhtar.

MAICHE Mohammed fateh

Résumé

L'utilisation de l'énergie se développe de plus en plus et est devenu une nécessité incontournable pour l'humanité, à partir du 1945 la consommation de d'énergie est multiplié par 10 entraînant une forte demande et une exploitation importante des énergies fossiles qui ont un effet pour l'environnement. Le recours aux énergies renouvelables et notamment éolienne est une solution pour notre avenir énergétique. Au début, la maintenance industrielle était simple et relativement économique et avec le développement des machinismes elle est devenue plus importante et plus onéreuse. Une bonne maintenance est indispensable pour le bon fonctionnement de l'ensemble des éoliennes du parc. Dans ce travail, on a appliqué un système de maintenance sur un parc éolien afin de préserver le maximum de son fonctionnement.

Abstract

The use of energy is growing more and more and has become an essential need for humanity, from the 1945 consumption of energy is multiplied by 10, resulting in a high demand and a significant use of fossil energies have an effect on the environment. The use of renewable energy including wind turbine is a solution to our energy future. At first, the industrial maintenance was simple and relatively inexpensive and with development machinisms became more important and more expensive. Proper maintenance is essential for the proper functioning of the entire wind park. In this work, we applied a system maintenance on a wind farm in order to preserve the maximum of its operation.

ملخص

إن استخدام الطاقة ينمو أكثر فأكثر وأصبح ضروري بالنسبة للإنسانية لا مفر منه، ابتداء من سنة 1945 تضاعفت عملية استهلاك الطاقة ب 10 مرات، مما أدى إلى ارتفاع الطلب والاستخدام الكبير للطاقات الأحفورية التي تؤثر على البيئة. استخدام الطاقة المتجددة بما في ذلك توربينات الرياح هو الحل الأمثل لمستقبل الطاقة لدينا. في بداية الأمر كانت الصيانة الصناعية بسيطة وغير مكلفة نسبيا ومع تطور الآلات أصبحت أكبر حجما وأكثر تكلفة. الصيانة المناسبة أمر ضروري لحسن سير العمل في حديقة الرياح بأكمله. في هذا العمل، قمنا بتطبيق نظام الصيانة في مزرعة الرياح من أجل الحفاظ على أقصى قدر من عملها.

Listes des figures et des abréviations

❖ Liste des figures :

Figure 1 : Le Soleil.....	05
Figure 2 : Générateur photovoltaïque	06
Figure 3 : chauffe-eau solaire.....	06
Figure 4 : Eolienne à axe verticale	08
Figure 5 : Eolienne à axe horizontale.....	08
Figure 6 : barrage d'eau.....	08
Figure 7 : Energie de vague.....	09
Figure 8 : schémas de l'énergie marémotrice.....	09
Figure 9 : Energie hydraulique.....	10
Figure 10 : schéma de fonctionnement de l'énergie thermique.....	10
Figure 11 : la biomasse.....	11
Figure 12 : Energie biomasse.....	12
Figure 13 : La géothermie.....	13
Figure 14 : Constitution d'une éolienne.....	18
Figure 15 : schéma d'une station de fourniture et de production d'énergie électrique par aérogénérateur.....	20
Figure 16 : classification des méthodes de la maintenance.....	27
Figure 17 : Les différentes formes de maintenance.....	29
Figure 18 : Origine des turbulences.....	42

❖ Liste des abréviations :

Wh : Watts heures : unité de la quantité d'énergie consommée ou à utiliser

(W×heures)

E : quantité journalière d'énergie à utiliser (Wh)

n : nombre de jours où le vent n'atteint pas sa valeur minimale

E_b : quantité d'énergie que doivent fournir les batteries pendant n jours (Wh)

V_b: tension des batteries (V)

C_b : Capacité de la batterie (Ah)

SOMMAIRE

Introduction générale.....	A
Chapitre 1 : Généralité sur les énergies renouvelables	
1.1 Introduction.....	04
1.2 Différent type de l'énergie renouvelable.....	05
1.2.1. Energie solaire.....	05
1.2.2 Les modules photovoltaïques.....	06
1.2.3 Principe de fonctionnement	07
1.3. Énergie éolienne.....	07
1.4.Énergie hydraulique.....	08
1.5. Énergie biomasse.....	11
1.5.1. Constituants de la biomasse.....	12
1.5.2. Les intérêts de la biomasse.....	13
1.6.Énergie géothermie.....	13
1.7.Conclusion	14
2. Chapitre 2 : Énergie éolienne : Principe et Application	
2.1. Introduction.....	16
2.2. Utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'électricité.....	17
2.2.1. principe de fonctionnement d'une éolienne.....	18
2.2.2. Configuration d'une station éolienne pour la production d'électricité.....	19
2.2.2.1. Le multiplicateur.....	19
2.2.2.2. La génératrice électrique.....	19
2.2.2.3. Le dispositif de stockage.....	20
2.2.2.4. Le dispositif de contrôle.....	20
2.2.3. Potentiel éolien.....	20
2.3. Conclusion.....	21
3. Chapitre 3 : Etat de l'art sur la Maintenance Industrielle	
3.1. Aperçu Historique	23
3.2. Définition de la maintenance.....	23
3.3. Importance de la maintenance dans l'entreprise.....	24
3.4. Rôle de la maintenance.....	25
3.5. Typologie de la Maintenance des machines.....	25
3.6. Typologie de la maintenance des logiciels.....	27
3.7. Niveaux de Maintenance.....	28

3.8. Les sigles de la maintenance.....	29
3.9. Maintenance et humour.....	30
3.10. Les activités de la maintenance industrielles.....	31
3.10.1. Les activités opérationnelles.....	31
3.10.2. Les activités de suivi.....	32
3.10.3. Les révisions.....	32
3.11. Maintenance des éoliennes.....	33
3.12. Conclusion.....	34
4. Chapitre 4 : Conception d'un plan de maintenance pour un parc éolien	
4.1. Introduction	36
4.2 Critères de choix des sites éoliens	36
4.3 Le temps de l'exploitation et de la maintenance.....	37
4.3.1. Maintenance préventive.....	38
4.3.2. Maintenance corrective légère.....	39
4.4. Evaluation du bruit généré par les éoliennes.....	39
4.4.1. Facteurs de bruit.....	40
4.4.1.1 Bruits d'origine mécanique.....	40
4.4.1.2 Bruits d'origine aérodynamique.....	41
4.5. Conception d'un système éolien autonome	42
4.5.1. Evaluation du site	42
4.5.2. Evaluation des besoins en énergie.....	42
4.5.3. Taille de l'éolienne et de la tour à installer.....	42
4.5.4. Calcul de la capacité de stockage des batteries.....	43
4.6. Conclusion	43
4.7. Conclusion générale.....	44
4.8. Bibliographie	45



Introduction Générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir.

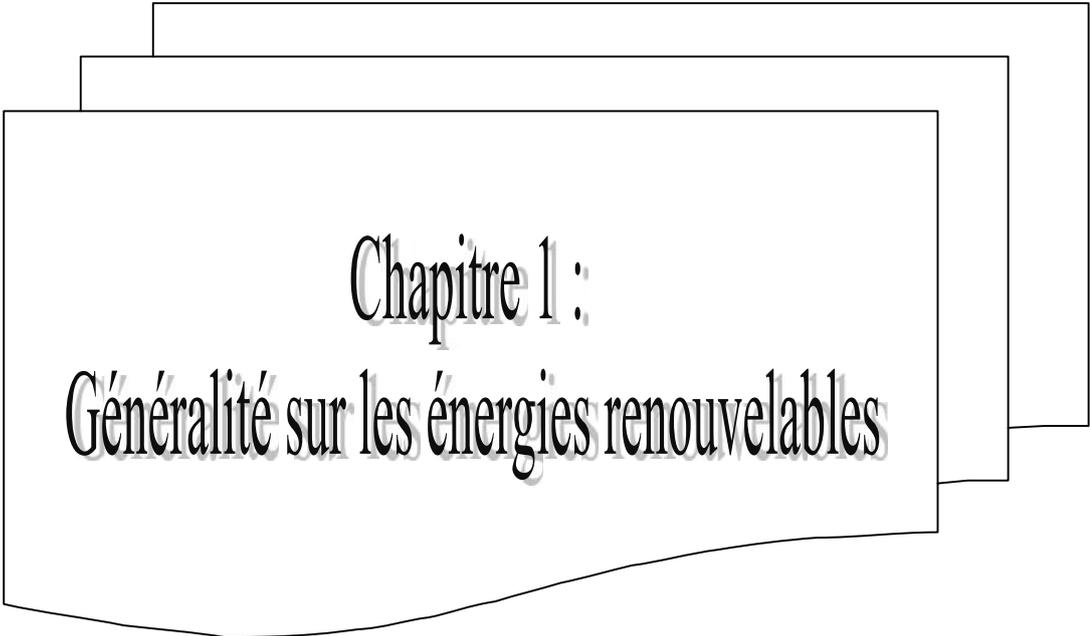
En effet les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à de fortes émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduites réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'objet de notre travail est la conception d'un plan de maintenance pour un parc éolien. Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des éoliennes à axe horizontal et des éoliennes à axe vertical et l'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques.

Il y a plusieurs facteurs qui provoquent le système comme le facteur du bruit et le potentiel du vent et les défauts les plus courants sont aérodynamique et mécanique et électrique donc il faut faire la conception de maintenance pour le parc éolien à base du diagnostic à partir des étapes du diagnostic et localiser les défauts à partir du plan mathématique et d'études des signatures sur la forme d'ondes et l'étude fréquentielle signaux acoustiques, température et l'étude vibratoire et après donner le prix de décision et maintenir le parc éolien toujours disponible.



Chapitre 1 :
Généralité sur les énergies renouvelables

Chapitre1

Généralités sur les énergies renouvelables

1.1 Introduction

Depuis la révolution industrielle au 19^{ème} siècle, l'utilisation de l'énergie a pris de l'ampleur, et l'exploitation de nouvelles formes d'énergie est devenue une nécessité pour assurer le niveau de vie actuel de l'humanité.

En effet, l'exploitation massive des énergies conventionnelles ne cesse de s'accroître, durant le 20^{ème} siècle, la consommation d'énergie est multipliée par 10 avec une accélération à partir de 1945 [1], ce qui a pour effet l'épuisement des ressources traditionnelles en matière d'énergie.

En outre, le réchauffement climatique est une autre conséquence de l'exploitation massive des hydrocarbures qui produisent de grandes quantités de gaz à effet de serre. Au 20^{ème} siècle, des scientifiques ont indiqué une augmentation de 0.6°C de la température moyenne de la planète et selon un rapport réalisé par le GIEC (groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) en 2007, la température moyenne de la planète va augmenter de 1.8 à 4°C d'ici la fin du XXI^{ème} siècle.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Par exemple, le bois est une énergie renouvelable tant qu'on abat moins d'arbres qu'il n'en pousse. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition.

La notion d'énergie renouvelable est souvent confondue avec celle d'énergie propre ; Or, même si une énergie peut être à la fois renouvelable et propre, toutes les énergies renouvelables ne sont pas nécessairement propres : par exemple, certains fluides frigorigènes utilisés dans les circuits des pompes à chaleur géothermiques sont des gaz qui, en cas de fuite, contribuent à l'effet de serre détruisant aussi la couche d'ozone.

Les énergies renouvelables (bois, solaire, hydroélectricité...) sont tous issues de l'énergie solaire, à part : la géothermie et les marées. Hormis l'énergie marémotrice provenant des forces d'attractions combinées du Soleil et de la Lune, toutes les énergies renouvelables ont donc pour origine l'énergie cas nucléaire naturelle, provenant : soit du soleil, due à la fusion nucléaire de l'hydrogène), soit de la Terre, due à la désintégration naturelle des roches de la croûte terrestre).

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau, placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité.

1.2. Différent type de l'énergie renouvelable

1.2.1. Energie solaire

Le Soleil (figure 1) émet un rayonnement électromagnétique dans lequel on trouve notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique émettent de l'énergie. Le niveau d'irradiante (le flux énergétique) arrivant à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.



Figure 1 : Le Soleil

- Énergie solaire thermique, production de chaleur, par conversion de l'énergie contenue dans le rayonnement solaire, très rentable pour le chauffage dans les régions ensoleillées.

- Énergie solaire thermodynamique ou héliothermodynamique ou encore thermo solaire, production de vapeur à partir de la chaleur du soleil par concentration, puis conversion de la vapeur en électricité,
- Énergie photovoltaïque, production d'électricité à partir de la lumière, notamment à l'aide de panneaux solaires. Énergie solaire passive, utilisation directe de la lumière pour le chauffage.

Les deux grandes familles d'énergies solaires à cycle court se distinguent :

- .l'énergie solaire thermique (Figure 3) qui utilise la chaleur transmise par rayonnement 'chauffe-eau solaire'.
- .l'énergie photovoltaïque (figure 2) qui utilise le rayonnement lui-même [2].



Figure2 : Générateur photovoltaïque



Figure3 : chauffe-eau solaire

- Énergie solaire thermique, production de chaleur, par conversion de l'énergie contenue dans le rayonnement solaire, très rentable pour le chauffage dans les régions ensoleillées.
- Énergie solaire thermodynamique ou héliothermodynamique ou encore thermo solaire, production de vapeur à partir de la chaleur du soleil par concentration, puis conversion de la vapeur en électricité,
- Énergie photovoltaïque, production d'électricité à partir de la lumière, notamment à l'aide de panneaux solaires. Énergie solaire passive, utilisation directe de la lumière pour le chauffage.

1.2.2 Les modules photovoltaïques

Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

1. Les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m² et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.
2. Les modules solaires poly cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.
3. Les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins. Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée.

1.2.3 Principe de fonctionnement

Le rayonnement solaire est reçu par un absorbeur qui a son tour chauffe soit un fluide caloporteur soit l'eau directement. Un vitrage est placé devant l'absorbeur, ainsi le rayonnement est « capturé » : en d'autres termes, c'est l'effet de serre.

1.3. Énergie éolienne

Elle a été exploitée à l'origine à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile, comme ceux que l'on peut voir aux Pays-Bas ou encore ceux mentionnés dans Don Quichotte. Ces moulins permettaient de pomper l'eau ou d'actionner des meules pour moudre le grain. Aujourd'hui, on retrouve ce système dans des éoliennes de pompage. Plus petites et possédant plus de pales qu'un moulin traditionnel, elles tournent plus rapidement. On peut en trouver notamment dans les grandes plaines des États-Unis.

Une autre utilisation ancestrale de l'énergie éolienne, bien plus ancienne encore que les moulins à vent, est la force propulsive du vent, utilisée dès l'Antiquité pour se déplacer sur l'eau avec des bateaux à voile, comme en témoigne la Barque solaire de Khéops.

Une éolienne est constituée par:

- le rotor, avec des pales montées sur un moyeu ;
 - la transmission mécanique, qui transforme le mouvement de rotation du rotor en un mouvement utilisable par la charge ;
 - une génératrice électrique, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique ;
 - un système d'orientation, qui oriente la nacelle face au vent ;
-

- un système électrique, qui gère la connexion au réseau et le fonctionnement de l'éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses.



Figure 4 : Eolienne à axe verticale

Figure 5 : Eolienne à axe horizontale

1.4.Énergie hydraulique:

L'énergie hydraulique est l'énergie issue du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité



Figure 6: barrage d'eau

Depuis l'invention de l'électricité cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines :

Énergie des vagues (Figure 7) : elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pélamis, sorte de vers en métal articulé ou le Searev. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.



Figure 7 : Energie de vague

Énergie marémotrice (Figure 8) : elle est produite par le mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),

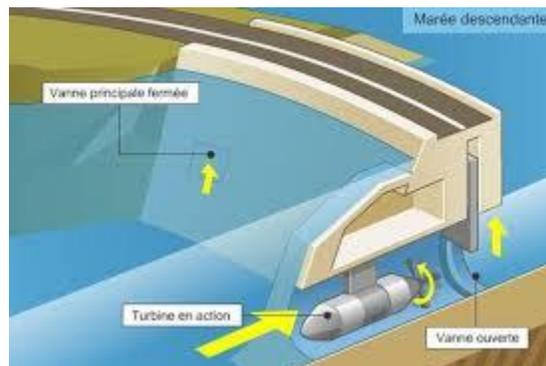


Figure 8 : schéma de l'énergie marémotrice

Énergie hydraulique (Figure 9) : elle est issue de l'utilisation des courants sous marins,



Figure 9: Energie hydraulique

Énergie thermique des mers (Figure 10) : elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,

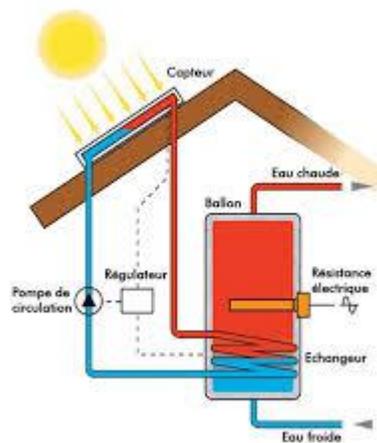


Figure 10: schéma de fonctionnement de l'énergie thermique

Énergie osmotique : elle a pour origine la diffusion ionique qui a lieu lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau salée de la mer. L'idée remonte aux années 70, c'est donc une énergie nouvelle, elle consiste à tirer parti du phénomène d'osmose qui se produit lors du mélange d'eau de mer et d'eau douce (grâce à leur salinité différente). La première centrale osmotique a été ouverte à Hurum en Norvège par la société Statkraft à l'embouchure du Fjord d'Oslo au bord de la Mer du Nord. Il s'agit encore d'un prototype destiné à tester la fiabilité du processus et à en améliorer le rendement, mais l'ouverture d'une première centrale industrielle est prévue pour 2015.

Une centrale de la taille d'un terrain de football pourrait produire de l'électricité pour 30 000 ménages. D'après l'entreprise, à terme 50 % de la production électrique de l'Union Européenne pourrait être d'origine osmotique.

1.5. Énergie biomasse:

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse (Figure 11) regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Ces matières organiques qui proviennent des plantes sont une forme de stockage de l'énergie solaire, captée et utilisée par les plantes grâce à la chlorophylle. Elles peuvent être utilisées soit directement (bois énergie) soit après une méthanisation de la matière organique (biogaz) ou de nouvelles transformations chimiques (biocarburant). Elles peuvent aussi être utilisées pour le compostage. La biomasse est une énergie qui peut être chimiquement polluante lorsqu'elle est mal utilisée.



Figure11 : la biomasse

Bien qu'elle libère du CO₂ en brûlant, comme le charbon, le gaz ou le pétrole, il ne faut pas oublier que le carbone stocké dans la biomasse a récemment été extrait de l'atmosphère par la photosynthèse des plantes ou algues, alors que ce processus a eu lieu il y a des millions d'années pour les ressources fossiles. Le bilan quantitatif CO₂ est donc nul mais à condition que toute l'énergie qu'il a fallu dépenser pour extraire du combustible de la biomasse soit elle aussi d'origine biomasse, sinon il y aurait alors un bilan CO₂ défavorable.

En régime industriel établi, l'on utilisera pour ce conditionnement du combustible biomasse. Il faut par contre faire très attention à ne pas libérer d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane (CH₄) qui a un pouvoir réchauffant environ 21 fois plus important que CO₂ : la moindre fuite sérieuse dans une installation peut rendre son bilan GES très négatif. L'énergie tirée de la biomasse peut dans la plupart des cas être considérée comme une énergie renouvelable. A l'heure actuelle, on constate un manque de

visibilité et de structuration de cette filière en plein développement. Avec 30,7 % du total mondial, les Etats-Unis sont le premier producteur d'électricité à partir de la biomasse, devant l'Allemagne et le Brésil (7,3 %) [3].



Figure12: Energie biomasse

1.5.1. Constituants de la biomasse:

On distingue trois constituants principaux, auxquels correspondent des procédés de valorisation spécifiques :

La biomasse ligne cellulosique, ou lignine, constituée par :

- le bois et les résidus verts
- la paille
- la bagasse de canne à sucre
- le fourrage

La valorisation se fait plutôt par des procédés par voie sèche, dits conversions thermochimiques. La biomasse à glucide, riche en substance glucidique facilement hydrolysable :

- les céréales
- les betteraves sucrières
- les cannes à sucre

La valorisation se fait plutôt par fermentation ou par distillation dits conversions biologiques. La biomasse oléagineuse, riche en lipides :

- Colza
- Palmier à huile, etc.

Elle peut être utilisée comme carburant. Il y a deux familles de biocarburants :

les esters d'huiles végétales (colza) et l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'Ethyl Tertio Butyl Ether (ETBE, voir bioéthanol).

1.5.2. Les intérêts de la biomasse:

La valorisation énergétique du bois est intéressante:

- C'est une source d'énergie renouvelable à condition de bien gérer les forêts.
- C'est une énergie dont le coût est compétitif et dont le prix varie peu.
- C'est une énergie moins polluante que les énergies fossiles. Il n'y a pas de rejets de soufre dans les fumées. Il n'y a pas d'impact sur l'effet de serre : le CO₂ rejeté dans l'atmosphère correspond à la quantité de CO₂ absorbée par les arbres pendant leur croissance.
- C'est une énergie dont la valorisation est créatrice d'emplois locaux.

1.6.Énergie géothermie :

La géothermie (Figure 13) est l'extraction d'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1 000 °C à 4 300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères [4]. Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement :

- La haute (>180°C)
- moyenne (>100°C)
- basse (>30°C)
- et très basse énergie

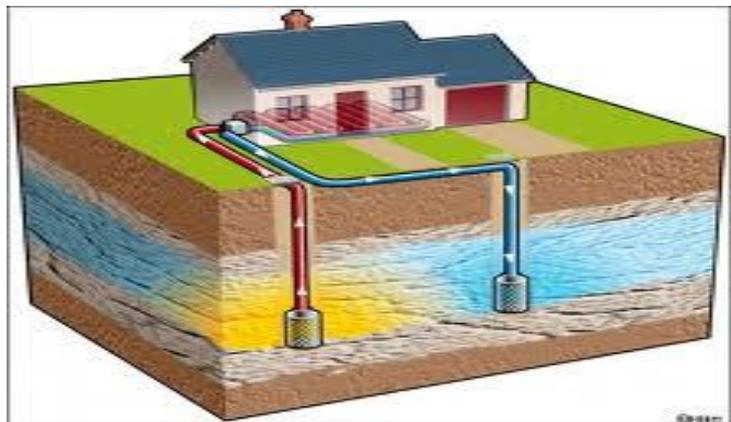


Figure 13: La géothermie

Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière [5].

En 1995 la puissance installée dans le monde était de l'ordre de 7000 MW (il s'agit de production de l'électricité donc de la géothermie grande et moyenne énergie). En 2004 ce chiffre est passé à près de 8500 MW. En Europe, les installations utilisant les pompes à chaleur permettent d'extraire théoriquement environ 1000MW de puissance sous forme de la chaleur. Ce chiffre augmente chaque année d'environ 50MW installé [6].

1.7. Conclusion

Le développement des énergies renouvelables apparaît comme le meilleur moyen de satisfaire les besoins en énergie de la planète, qui pourraient augmenter de 50% ou plus d'ici 2030 , car elles permettent :

- D'atteindre une plus grande indépendance énergétique :

Aujourd'hui, les pays importent l'énergie primaire qu'ils consomment pour produire de l'électricité, soit principalement du charbon, du gaz et du pétrole. Ces ressources se raréfient et leur prix augmente

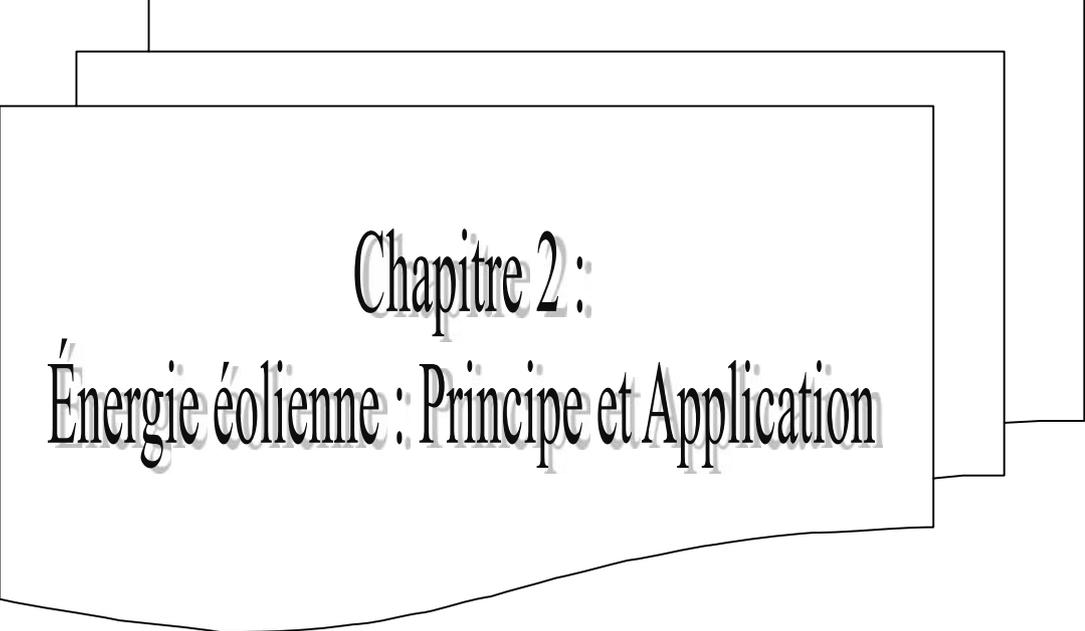
Or, les énergies renouvelables dépendent de ressources abondantes, directement accessibles sur notre territoire : soleil, vent, eau, bois, biomasse, chaleur de la terre... Elles assurent un approvisionnement sûr et maîtrisé sur le long terme.

- De lutter contre le changement climatique :

Elles évitent d'utiliser des énergies d'origine fossile fortement émettrices en gaz à effet de serre, responsables du changement climatique.

- De créer des nouvelles filières professionnelles et des emplois :

Le développement des énergies renouvelables entraîne la création d'emplois décentralisés et donc non délocalisables, et favorisent l'émergence de nouvelles filières industrielles et technologiques.



Chapitre 2 :
Énergie éolienne : Principe et Application

Chapitre 2

Energie éolienne principe et application

2.1 Introduction

Tout comme l'énergie qui se trouve dans les combustibles fossiles, les énergies renouvelables (sauf les énergies marémotrice et géothermique) sont dérivée de l'énergie solaire. En effet, le soleil émet chaque heure quelque $1.74 \cdot 10^{14}$ kilowattheures d'énergie à notre planète. La terre reçoit en d'autres termes, une puissance équivalente à $1.4 \cdot 10^{17}$ watts. [7]

Environ un à deux pour cent de l'énergie émise par le soleil est converti en énergie éolienne.

La technologie éolienne génère de l'électricité à partir d'un élément naturel inépuisable, le vent qui entraîne un mouvement de rotation des pales. Le principe de fonctionnement permet de transformer cette énergie mécanique en énergie électrique.

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le plus souvent cette énergie est elle-même transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage, dont un type particulier est l'éolienne Bollée. Ernest Sylvain Bollée a utilisé ce mot « éolienne » pour la première fois (1885) comme nom commun et non plus comme un adjectif (énergie éolienne). Le mot se retrouve dans le Larousse quelques années plus tard en 1907.

Les termes de parc éolien ou de ferme éolienne sont utilisés pour décrire les unités de production groupées (installées à terre ou en mer).

Les États dans le monde où les champs éoliens sont les plus nombreux sont la Chine, l'Allemagne, l'Espagne, les États-Unis et le Danemark.

En France, les centrales éoliennes de production d'électricité sont en pleine expansion sur une grande partie du territoire. L'Aude, la Bretagne et la Champagne-Ardenne sont des zones géographiques pionnières en la matière.

2.2. Utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'électricité

Un mât permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal) ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.). Les mâts sont généralement en acier, mais des mâts de béton sont de plus en plus utilisés par certains producteurs (par exemple en France, pour environ 1000 éoliennes montées de 2004 à début 2013 par Enron, 300 ont un mât de béton).

Une nacelle montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine. La nacelle peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction.

Un rotor, composé de plusieurs pales (en général trois) et du nez de l'éolienne, fixé à la nacelle. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique...).

Des éléments annexes, comme un poste de livraison pour injecter l'énergie électrique produite au réseau électrique, complètent l'installation.

Une éolienne se modélise principalement à partir de ses caractéristiques aérodynamiques, mécaniques et électrotechniques. En pratique, on distingue aussi le « grand éolien », qui concerne les machines de plus de 250 kW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 kW et 250 kW) et du petit éolien (inférieur à 36 kW).

➤ Axe horizontal

Une éolienne à axe horizontal est une hélice perpendiculaire au vent, montée sur un mât. La hauteur est généralement de 20 m pour les petites éoliennes, et supérieure au double de la longueur d'une pale pour les modèles de grande envergure.

Aujourd'hui les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180 m en bout de pale avec un moyeu à 120 m pour une puissance de 6 MW.

2.2.1 principe de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. La très large majorité des éoliennes installées dans le monde sont des machines à axe horizontal (1,2 ou 3 pales verticales), car leur rendement est supérieur à celui des autres types d'éoliennes.

1 : automate

2 : anémomètre, girouette

3 : moteur d'orientation

4 : arbre lent

5 : multiplicateur

6 : arbre rapide

7 : génératrice

8 : frein à disque

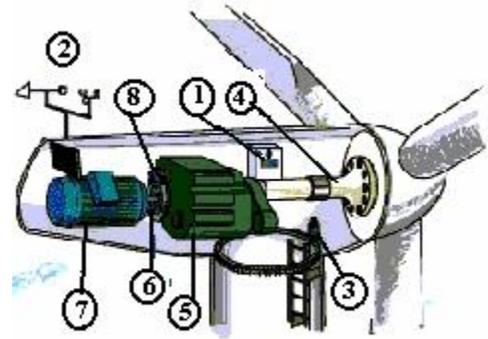


Figure 14 : Constitution d'une éolienne

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5m/s), l'automate (1) de la figure 1.1, renseigné par l'anémomètre et la girouette (2) fixés au sommet de la nacelle, commande au moteur d'orientation (3) de placer l'éolienne face au vent. Le vent entraîne les pales qui font tourner un arbre lent (4). Le multiplicateur (5) augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide (6). Celui-ci transmet le mouvement rotatif au générateur (7) qui produit de l'énergie électrique.

Les éoliennes de puissance ne fonctionnent et ne produisent pas en permanence. Elles ont besoin d'une vitesse de vent minimale pour commencer à produire de l'énergie. Inversement, elles se freinent puis s'arrêtent automatiquement lorsque la vitesse du vent est très élevée (environ 100 km/h). Ainsi, les aérogénérateurs ne produisent de l'électricité qu'entre deux vitesses de vent appelées 'vitesse de démarrage' et 'vitesse de coupure'.

Pour freiner la rotation des éoliennes, on utilise souvent le principe de pales à pas variable ou 'pitch control': les pales sont mobiles autour de leur axe longitudinal et s'orientent automatiquement de façon à diminuer la portance au vent. Lorsque la vitesse du vent est trop importante et que ce mécanisme ne suffit plus à freiner le mouvement, rotatif l'éolienne se place perpendiculairement au vent (on dit qu'elle se met en drapeau, comme les voiles d'un bateau). Le rotor devient ainsi immobile.

Un autre système de régulation, appelé 'stall control' est également parfois utilisé : c'est alors le profil

aérodynamique de la pale qui permet à l'éolienne de réguler. [8][9]

Les éoliennes disposent en outre d'un frein mécanique (8), dit frein d'urgence, (figure 14).

Celui-ci, placé sur l'arbre rapide, permet de suppléer le freinage par les pales en cas de défaillance, ou bien de maintenir l'éolienne en position arrêtée en période de maintenance.

2.3 Configuration d'une station éolienne pour la production d'électricité:

Toutes les stations éoliennes destinées à la production d'énergie électrique ont une configuration qui correspond à l'organigramme de la (figure 15). [8]

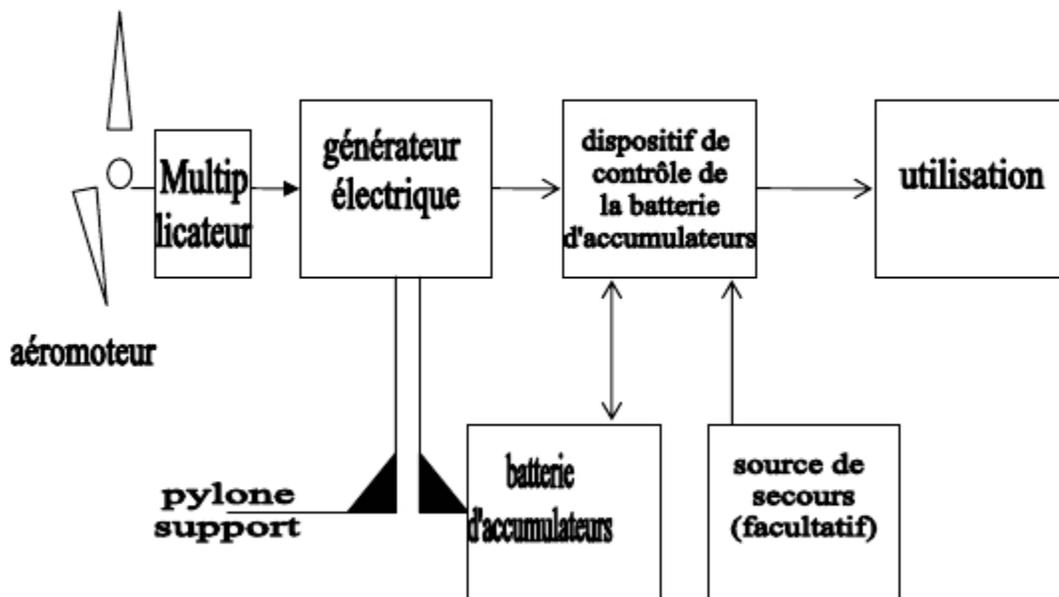


Figure 15: schéma d'une station de fourniture et de production d'énergie électrique par aérogénérateur

2.3.1 Le multiplicateur

Le multiplicateur est un convertisseur de puissance. Il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique.

2.3.2 La génératrice électrique

La génératrice électrique transforme l'énergie mécanique en une énergie électrique. Les génératrices

des éoliennes diffèrent un peu des autres types de génératrices raccordées au réseau électrique. Une des raisons pour cette différence est que la génératrice d'une éolienne doit pouvoir fonctionner avec une source de puissance (c'est-à-dire le rotor de l'éolienne) qui fournit une puissance mécanique (un couple) très fluctuante.

La génératrice peut être soit synchrone. Elle produit du courant alternatif à fréquence variable et le courant alternatif à fréquence variable n'est pas utilisable dans le réseau électrique public. Par conséquent, il faut d'abord le convertir en courant continu. La conversion de courant alternatif à fréquence variable en courant continu est réalisée par l'emploi de redresseurs. Ce courant est ensuite converti en courant alternatif à fréquence fixe, puis filtré dans le cas d'un raccordement au réseau.

2.3.3 Le dispositif de stockage

La caractéristique essentielle du vent est sa discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée, afin de l'utiliser pendant les périodes de calme.

Les systèmes de stockages les plus utilisés sont les batteries d'accumulateurs au plomb

2.3.4 Le dispositif de contrôle

Un système de régulation et de contrôle est nécessaire pour protéger les batteries des surcharges et décharges profondes.

Le dispositif est remarquable en ce que le circuit intégré comprend un compteur qui agit sur une unité centrale de commande asservie par une horloge, un circuit d'acquisition de données qui contrôle le secteur, un circuit de télécommande pour piloter les différentes fonctions, un circuit d'acquisition d'informations notamment sur les valeurs des courants et la tension de la batterie, un circuit de commande de signalisation et un circuit apte à générer les impulsions de commande du système de charge.

2.3.5 Potentiel éolien

L'Algérie a un régime de vent modéré et une étude de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie[10].

Cette étude montre que le sud du pays est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus

particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s. Elle dépasse même la valeur de 6m/s sans atteindre 7m/s dans la région d'Adrar et se situe entre 5m/s et 6m/s pour la région de Tindouf, et entre 4 et 5 m/s dans la chaîne passant par Bechar, Timimoune, In Salah et Tamanrasset et à Biskra. Elle peut atteindre la vitesse de 4 m/s à Alger, Ghardaïa et Hassi Messaoud.

2.4 Conclusion

Les principaux avantages de cette énergie renouvelable sont : - l'autonomie en électricité, -la possibilité de produire continuellement de façon journalière. Ce secteur, en particulier, connaît une croissance annuelle de 25 %. [11]

C'est l'industrie européenne qui domine le marché, d'après la référence [11] elle représente 60% du marché mondial et un taux d'accroissement annuel de plus de 35%.

Les objectifs qui étaient assignés à ce secteur en 1997 pour l'an 2000 ont été doublés (8000MW installés au lieu des 4000 MW prévus).

Cette croissance rapide a amené les planificateurs à revoir les chiffres projetés initialement pour 2030, pour affirmer qu'ils seront vraisemblablement atteints en 2020 (avec 100 000 MW de puissance installée dans le monde)

Cette croissance est accompagnée d'une amélioration constante de la technologie, avec des machines plus puissantes, plus performantes et à moindre coût (éolienne de 2.5 MW inaugurées en RFA en juin 2001). Parallèlement, les coûts de production sont en baisse de 15% par an. [7].

Seulement si besoin 24 heures sur 24 de l'électricité, on doit envisager l'installation d'un système de secours ou fait la conception d'un plan de maintenance pour le parc éolien basé à la nature climatique et les défauts plus courants basés sur le plan mathématique de systèmes.



Chapitre 3 :
Etat de l'art sur la Maintenance Industrielle

Chapitre 3

Etat de l'art sur la Maintenance Industrielle

3.1. Aperçu Historique

L'histoire de la maintenance peut se décomposer en trois étapes :

D'abord la période où les machines étaient simples et peu nombreuses, mais la main-d'œuvre de fabrication est importante, la maintenance était très élémentaire et son budget était noyé dans les frais généraux de l'entreprise.

Dans une seconde période, avec le développement du machinisme, la main d'œuvre diminue et, en valeur relative, la maintenance prend plus d'importance, elle a son budget autonome. Cette situation existe encore dans de nombreuses entreprises.

Une troisième période s'est ouverte avec le développement de l'automatisme. Dans les industries de processus, la plus grande part des effectifs de production appartient à la maintenance, dont les coûts et le budget se sont considérablement accrus. Le rapport entre les effectifs de maintenance et ceux de la fabrication est passé de 1/50 à 1/5.

3.2. Définition de la maintenance

Ce n'est pas seulement réparer ou dépanner au moindre coût ou remettre en état dans les plus brefs délais. Ce n'est pas non plus maintenir les installations en marche à tout prix ou assurer une sécurité de fonctionnement élevée, coûte que coûte, pour atteindre une disponibilité maximale mais non rentable. La maintenance commence dès la conception du matériel : il faut qu'il soit apte à être entretenu (notion de maintenabilité), ensuite à produire, son utilisation doit être aisée et sa sécurité maximale. Pendant toute sa vie de production la maintenance surveille le matériel, suit ses dégradations et le remet à niveau avec un contrôle des performances, une surveillance des coûts et disponibilités en recherchant les solutions les plus simples. En fin de vie, la maintenance propose d'abord une diminution des performances compatible avec les possibilités du matériel et enfin son renouvellement. Le ratio qui englobera tous ces aspects de la maintenance sera :

Service rendu {(Coût total (achat et maintenance) + Pertes de production) / (Service rendu), doit être minimum.}

3.3. Importance de la maintenance dans l'entreprise

Aucune autre fonction dans une installation de production, à l'exception peut-être de la recherche et du développement (bureau d'études), n'implique une aussi large gamme d'activités que celle de la maintenance. Dans le management de cette fonction, abondent les problèmes de planning, d'approvisionnement, de personnel, de contrôle de qualité, de gestion et des problèmes techniques. La maintenance embrasse toutes les activités, comme si elle constituait une industrie propre.

Pendant longtemps, la maintenance était considérée comme une fatalité, cependant, le progrès technologique ainsi que l'évolution de la conception de la gestion des entreprises ont fait que la maintenance est devenue de nos jours une fonction importante de l'entreprise dont la direction exige l'utilisation de techniques précises et dont le rôle dans l'atteinte des objectifs de l'entreprise est loin d'être négligeable.

Actuellement la modernisation de l'outil de production impose une évolution fondamentale dans le domaine de maintenance.

La maintenance est devenue une des fonctions de l'entreprise contemporaine, mais elle n'est pas une fin en soi. A ce titre, elle est peu lisible et parfois méconnue des décideurs qui sous-estiment son impact. Et pourtant, elle devient une composante de plus en plus sensible de la performance de l'entreprise. Il est donc important de la faire mieux connaître. Concevoir, produire et commercialiser sont des fonctions naturelles facilement identifiables et rarement négligées. Par contre, la maintenance n'est qu'un soutien à la production, son principal client.

En plus de ce qui a été dit, le terme de maintenance désigne, au sein de l'entreprise, plusieurs catégories de travaux notamment :

Surveillance et travaux simples (nettoyage, graissage, etc.) généralement dévolus aux utilisateurs du matériel ou des installations, Contrôle de fonctionnement et travaux plus complexes que les précédents, souvent effectués par des spécialistes, Dépannage et réparation en cas d'incident confiés à des ouvriers ou des équipes spécialisées, entretien systématique comportant des révisions partielles ou totales, faites sur place ou dans un atelier spécialisé, reconstruction complète de machines ou d'installations, constituant une véritable remise à l'état neuf [12].

3.4. Rôle de la maintenance

Le service maintenance doit mettre en œuvre la politique de maintenance définie dans l'entreprise celle-ci devant permettre d'atteindre le rendement optimal des systèmes seulement, dans une entreprise, tous les systèmes ne peuvent pas être considérés de la même manière d'un point de vue maintenance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies le mieux adaptées aux diverses situations. Il sera ainsi conduit à faire des prévisions ciblées :

Prévisions à long terme : elles concernent principalement les investissements lourds ou les travaux durables. C'est cette prévision qui est, la plus dictée par la politique globale de l'entreprise.

Prévisions à moyen terme : la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Alors il lui est nécessaire d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de fabrication. La production doit, elle aussi, prendre en compte les impératifs de suivi des matériels.

Prévisions à court terme : elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée voire de quelques heures. Même dans ces cas, avec le souci de perturber le moins possible la marche de la production, les interventions devront elles aussi avoir subi un minimum de préparation [13]

3.5. Typologie de la Maintenance des machines

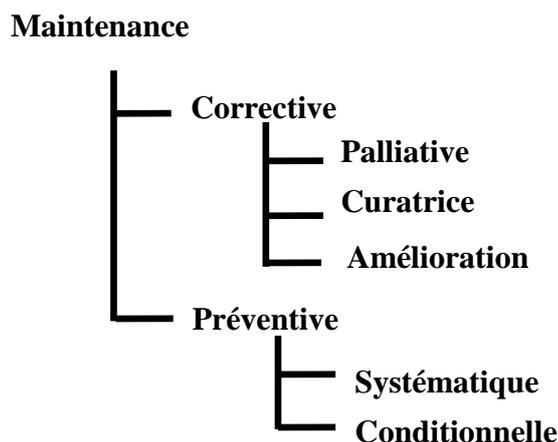


Figure16 : classification des méthodes de maintenance

Il existe deux façons complémentaires d'organiser les actions de maintenance :

La **maintenance corrective**, qui consiste à intervenir sur un équipement une fois que celui-ci est défaillant. Elle se subdivise en :

"Maintenance palliative: dépannage (donc provisoire) de l'équipement, permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie d'une fonction requise ; elle doit toutefois être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais.

"Maintenance curative «Maintenance curative : réparation(donc durable) consistant en une remise

En l'état initial. **Maintenance préventive**, qui consiste à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant, afin de tenter de prévenir la panne. On interviendra de manière préventive soit pour des raisons de "Sûreté de fonctionnement" sûreté de fonctionnement (les conséquences d'une défaillance sont inacceptables), soit pour des raisons économiques (cela revient

moins cher) ou parfois pratiques (l'équipement n'est disponible pour la maintenance qu'à certains moments précis). La maintenance préventive se subdivise à son tour en :

"Maintenance systématique": désigne des opérations effectuées systématiquement sur un "Calendrier" calendrier (à périodicité temporelle fixe), soit selon une "Périodicité" périodicité d'usage (heures de fonctionnement, nombre d'unités produites, nombre de mouvements effectués, etc.) ;

"Maintenance conditionnelle" Maintenance conditionnelle : réalisée à la suite de relevés, de mesures, de contrôles révélateurs de l'état de dégradation de l'équipement ;

"Maintenance prévisionnelle" Maintenance prévisionnelle : réalisée à la suite d'une analyse de l'évolution de l'état de dégradation de l'équipement.

Diverses méthodes permettent d'améliorer la planification et "Théorie de l'ordonnancement" des actions de maintenance :

"Réseau PERT" Réseau PERT

"Diagramme de Gantt" Diagramme de Gantt

Méthode "MERIDE" MERIDE

Analyse "AMDEC" AMDEC

Par ailleurs, il existe des logiciels de "Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur" gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO), spécialement conçus pour assister les services de maintenance dans leurs activités.

3.6. Typologie de la maintenance des logiciels

En informatique logicielle, on divise la maintenance en plusieurs types

"Maintenance corrective"**maintenance corrective** : elle consiste à corriger les défauts de fonctionnement ou les non-conformités d'un logiciel,

la "**Maintenance adaptative**"**maintenance adaptative** : sans changer la fonctionnalité du logiciel, elle consiste à adapter l'application afin que celle-ci continue de fonctionner sur des versions plus récentes des logiciels de base, voire à faire migrer l'application sur de nouveaux logiciels de base (un logiciel de base étant un logiciel requis pour l'exécution d'une application; exemples : système d'exploitation, système de gestion de base de données)

On parle également de "*Maintenance évolutive*"**maintenance évolutive** : cela consiste à faire évoluer l'application en l'enrichissant de fonctions ou de modules supplémentaires, ou en remplaçant une fonction existante par une autre, voire en proposant une approche différente. Mais au sens de l'AFNOR, ce n'est même plus de la maintenance, puisque la maintenance consiste précisément à assurer qu'un bien continue de remplir sa fonction correctement, non à l'améliorer [14].

Les différentes formes de la maintenance [15]

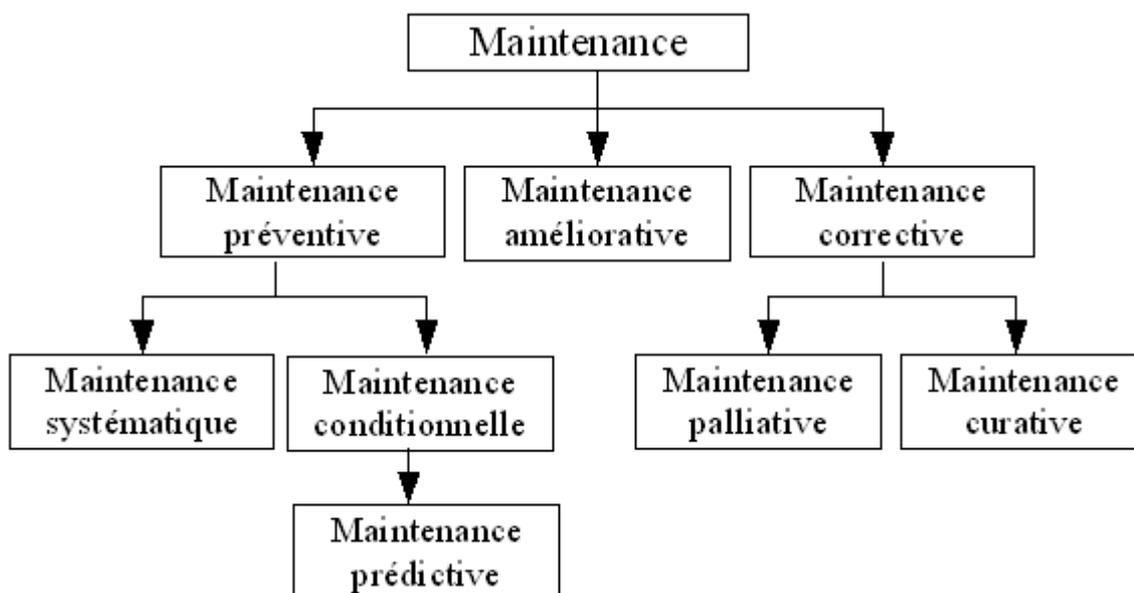


Figure17 : Les différentes formes de la maintenance

3.7. Niveaux de Maintenance

La norme NF X 60-010 définit, à titre indicatif, cinq « niveaux de maintenance » (comprendre « interventions ») :

Niveau 1

Travaux : réglages simples - pas de démontage ni ouverture

Lieu : sur place

Personnel : exploitant du bien

Exemple : remise à zéro d'un automate après arrêt d'urgence

Niveau 2

Travaux : dépannage par échange standard-opérations mineures de maintenance préventive

Lieu : sur place

Personnel : technicien habilité

Exemple : changement d'un relais-contrôle de fusibles - ré enclenchement de disjoncteur

Niveau 3

Travaux : identification et diagnostic de pannes - réparation par échange standard- réparations mécaniques mineures-maintenance préventive (par .ex. réglage ou réaligement des appareils de mesure)

Lieu : sur place ou dans atelier de maintenance

Personnel : technicien spécialisé

Exemple : identification de l'élément défaillant, recherche de la cause, élimination de la cause, remplacement

Niveau 4

Travaux : travaux importants de maintenance corrective ou préventive sauf rénovation et reconstruction - réglage des appareils de mesure - contrôle des étalons

Lieu : atelier spécialisé avec outillage général, bancs de mesure, documentation

Personnel : équipe avec encadrement technique spécialisé

Exemple : intervention sur matériel dont la remise en service est soumise à qualification.

Niveau 5

Travaux : rénovation - reconstruction - réparations importantes

Lieu : constructeur ou reconstruteur

Personnel : moyens proches de la fabrication

Exemple : mise en conformité selon réglementation d'équipements lourds

Il convient d'associer, dans la détermination des niveaux, la documentation et le matériel nécessaires.

3.8. Les sigles de la maintenance

De même que le mot et le concept, les nombreux sigles de la maintenance sont d'origine anglo-saxonne. Toute une néologie a vu le jour, dont l'élément le plus spectaculaire est la kyrielle des sigles commençant par « *MT* » (initiales de « *mean time* », littéralement « temps moyen » (anglicisme), c'est-à-dire durée moyenne, intervalle de temps moyen, et par voie de conséquence, moyenne des temps). Quelques sigles à titre d'exemples, assortis de leur traduction plus ou moins littérale:

Sigles de 4 lettres

MTBD : *mean time between defects*, temps moyen entre défauts

*"MTBE"**MTBE* : *mean time between errors*, temps moyen entre erreurs

*"MTBF"**MTBF* : *mean time before failure*, temps moyen avant défaillance (à ne pas confondre avec *mean time between failures*, infra)

*"Temps moyen entre pannes"**MTBF* : *mean time between failures*, temps moyen entre (deux débuts de) pannes (à ne pas confondre avec *mean time before failure* supra)

*"MTBM"**MTBM* : *mean time between maintenances*, durée moyenne entre maintenances

*"MTBO"**MTBO* : *mean time between overhauls*, temps moyen entre révisions

*"MTBR"**MTBR* : *mean time between removals*, temps moyen entre déposes

1/ *mean time to failure*, temps moyen jusqu'à la panne, temps moyen (de bon fonctionnement) sans panne (entre la fin d'une panne et le début d'une autre); 2/ *mean time to fix*, temps moyen entre l'apparition d'un problème et sa solution ;

MTTM : *mean time to maintenance*, temps moyen jusqu'à la maintenance

MTTN : *mean time to notification*, temps moyen de signalement (du problème)

1/ *mean time to recovery*, temps moyen jusqu'à la remise en route; 2/ *mean time to repair*, temps moyen jusqu'à la réparation; 3/ *mean time to restoration*, temps moyen jusqu'à la remise en service

MTUR : *mean time to unscheduled removal*, temps moyen (s'écoulant) jusqu'à la dépose non programmée.

Sigles de 5 lettres

MTBCF : *mean time between critical failures*, temps moyen entre (deux débuts de) pannes graves ou « critiques » (anglicisme) (sur matériel redondé à dégradation progressive)

MTBUR : 1/ *mean time between unscheduled removals*, temps moyen entre déposes non planifiées; 2/ *mean time between unscheduled replacements*, temps moyen entre remplacements non planifiés

"*MTTFF*" *MTTFF*: *mean time to first failure*, temps moyen jusqu'à la première défaillance

MTTUR : *mean time to unscheduled removal*, temps moyen jusqu'à la dépose non programmée.

3.9. Maintenance et humour

Devant l'inflation néologique décrivant les différents types de maintenance possibles (expressions sur le modèle adjectif + *maintenance* en anglais et *maintenance* + adjectif en français), quelques esprits malicieux ont inventé des expressions désignant des types de maintenance peu orthodoxes :

percussive maintenance (« maintenance percussive » ou « maintenance par percussion »), autrement dit la remise en marche par coup de pied ou par bourrade ;

Provocative maintenance (« maintenance provocative » ou « maintenance par

Provocation »), en d'autres termes la mise hors d'état de l'équipement.

Passive maintenance (" maintenance passive " ou " maintenance par absence d'action, en définition, l'attente de la remise en état d'un système.

Pour la maintenance en situation de crise ou d'urgence, il est question d'« *hysterical maintenance* » (« maintenance hystérique ») [16].

3.10. Les activités de la maintenance industrielles

A la diversité des formes et des méthodes de maintenance selon les besoins et les objectifs, se superpose la variété des matériels sur lesquels le service maintenance doit intervenir. Ce faisant l'activité globale du service est constituée de nombreuses activités qui se différencient par leur durée, leur urgence ou leur anticipation, leur objectif, leur niveau de préparation ou /et de

complexité, etc. néanmoins, il est possible de distinguer trois catégories : les activités opérationnelles, les activités de suivi et une catégorie qui opère la synthèse avec les deux précédentes.

3.10.1. Les activités opérationnelles

Les activités opérationnelles constituent for logiquement l'essentiel de la charge dans le cadre de la maintenance corrective et sont au nombre de deux :

Les dépannages

Action sur un bien en vue de le remettre en état de fonctionner. Le dépannage est donc une action à objectif unique et ponctuel : faire que le système défaillant puisse retrouver un niveau de performance.

La réparation

Intervention définitive de maintenance corrective effectuée après panne ou défaillance. La réparation est une opération de correction, de rectification qui est programmée, planifiée et pour laquelle tous les moyens ont été rassemblés (techniciens, temps, matériel, pièces de rechange).

3.10.2. Les activités de suivi

La maintenance préventive doit, pour remplir son rôle, connaître l'état ainsi que l'évolution du comportement des matériels. Pour cela il n'est d'autre moyen que la surveillance attentive et l'exploitation des données qui en découlent.

Les visites (ou visites préventives)

Opération de la maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout ou partie des éléments d'un matériel.

Les inspections

Les inspections se limitent à de la surveillance des systèmes. Les inspections ont pour principal objectif la découverte éventuelle d'amorces d'anomalies et peuvent, le cas échéant, comprendre quelques réglages simples pratiqués avec un outillage ordinaire. Contrairement aux visites, elles peuvent être menées en cours de production.

Les contrôles

La plupart du temps, les contrôles correspondent à des comparaisons de relevés, à des caractéristiques pré-établies, notamment dans le cadre des matériels soumis à la législation. Les résultats, consignés dans un rapport de contrôle, conduisent éventuellement à une décision qui peut aller de la réparation immédiate à l'arrêt de la production, en passant par l'obligation d'une visite pour établir une liste de points à corriger en maintenance corrective.

3.10.3. Les révisions

Comme les trois activités de suivi, les révisions sont régies par un planning prédéfini par unité de temps ou d'usage mais, à l'instar des activités opérationnelles, elles incluent des opérations physiques sur le matériel. Dans le cas de matériels soumis à la réglementation, le rythme et l'importance des révisions sont imposés par la loi. Le volume de travail est plus ou moins important suivant le type de visite. Il y a les visites de routine, très rapprochées, les visites partielles ou limitées et les visites générales qui souvent induisent des travaux lourds [13].

3.11. Maintenance des éoliennes

Maintenance conditionnelle et préventive

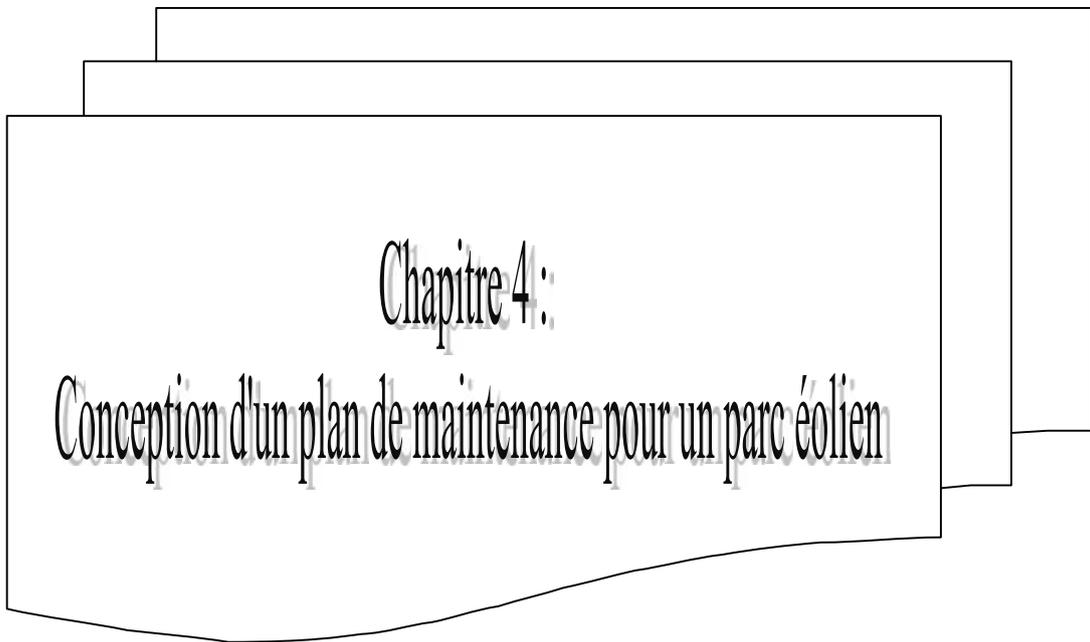
La maintenance préventive des éoliennes a pour but de réduire les coûts d'interventions et d'immobilisation des éoliennes. En effet, grâce à la maintenance préventive, les arrêts de maintenance sont programmés et optimisés afin d'intervenir sur les pièces d'usure avant que n'intervienne une panne. Les arrêts de production d'énergie éolienne sont anticipés pour réduire leur durée et leurs coûts.

La maintenance préventive selon les préconisations des constructeurs : les opérations de maintenance portent essentiellement sur :

- L'analyse des huiles,
- L'analyse vibratoire des machines tournantes,
- L'analyse électrique,
- La thermographie des éoliennes.
- L'analyse des huiles des éoliennes : Les éoliennes sont des machines tournantes qui possèdent des besoins importants en lubrification. L'analyse des huiles permet de détecter des anomalies telles que l'usure par abrasion, la contamination par des particules internes à l'éolienne ou la pollution par des éléments extérieurs à l'éolienne. L'analyse des huiles permet d'estimer la qualité des huiles et de réaliser une opération de maintenance préventive avant qu'un incident intervienne et stoppe la production d'énergie éolienne.
- L'analyse vibratoire des machines tournantes : les éoliennes doivent faire l'objet d'analyses vibratoires complexes car les vibrations anormales peuvent engendrer des pannes graves ou des ruptures de matériaux. Ainsi, les contraintes mécaniques que subissent les pièces rotatives des éoliennes sont étudiées avec minutie afin de prévenir tout risque et tout arrêt de la production d'électricité éolienne. Les principaux défauts mis en évidence par l'analyse vibratoire des éoliennes sont : le déséquilibre des lignes d'arbres, la dégradation des accouplements, les jeux et l'usure des roulements Maintenance

3.12. Conclusion

La maintenance est une opération obligatoire pour tout système industriel. Son rôle étant de préserver l'outil de travail ainsi que la continuité du fonctionnement pour une meilleure protection de l'outil de travail. Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de maintenance industrielle et le timing et les modalités de son application.



Chapitre 4 :
Conception d'un plan de maintenance pour un parc éolien

Chapitre 4

Conception d'un plan de maintenance pour un parc éolien

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les principes de la maintenance sur un système à énergies renouvelables qui est un parc éolien. Ce parc éolien est composé de plusieurs éoliennes qui produisent de l'électricité à grande échelle. Le fonctionnement des éoliennes ne peut être efficace et durable sans une bonne maintenance et un bon entretien.

4.2 Critères de choix des sites éoliens

Avant d'implanter une ou plusieurs éoliennes, l'observation du potentiel éolien, c'est-à-dire l'histoire des vents du site, depuis au moins une décennie, est fondamentale. De plus, pour avoir une idée des variations durant l'année, une étude de la répartition du vent est réalisée sur place pendant cette période [17,18].

En général, un lieu en hauteur et éloigné des habitations est privilégié pour la mise en place de l'éolienne car son efficacité dépend grandement de son emplacement.

En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, et les sites seront d'abord choisis en fonction de la permanence de vents de force suffisante. Un site avec des vents d'environ 30km/h en moyenne sera toujours bien meilleur (de l'ordre de 8 fois) qu'un autre site avec des vents de 15km/h en moyenne.

Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence dû vent. En effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à une valeur comprise entre 10 et 20km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient soit à la destruction de l'éolienne, soit à des coûts de construction et de maintenance prohibitifs. La vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent possible entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne. De même, l'axe de rotation de l'éolienne doit rester le plus clair du temps parallèle à la direction du vent. Même avec un système d'orientation de la nacelle performant, il est donc préférable d'avoir un vent le moins fluctuant possible dans sa direction pour obtenir un rendement optimal.

Certains sites sont ainsi à proscrire car le vent est trop turbulent : la proximité d'obstacles (arbres, bâtiments, escarpements...).

On recherche habituellement les sites propices à l'installation d'éoliennes en observant les arbres et la

végétation. Le site est intéressant s'ils sont constamment courbés par les vents. Une autre façon de procéder est d'utiliser une carte de la vitesse des vents, ou des données accumulées par une station météorologique proche.

Certains sites bien spécifiques sont particulièrement propices à un bon rendement :

L'effet tunnel ou effet Venturi : au niveau des cols entre deux montagnes, ou entre deux grands bâtiments, le vent est souvent plus fort.

L'air est comprimé entre les montagnes ou les bâtiments, et, pour garder un débit d'air constant, la vitesse augmente donc considérablement. De plus, le vent garde souvent une direction constante. Ces lieux sont donc très appropriés pour les éoliennes.

Le problème est qu'ils sont souvent restreints. Et qu'il est difficile d'y placer une grande quantité d'éoliennes. La mer et les lacs sont aussi des emplacements de choix [19]: il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse importante. La proximité d'une côte escarpée, en revanche, créera également des turbulences à éviter.

L'évaluation régionale s'inscrit dans une phase que nous appellerons de pré-siting. Selon [20], cette phase fait la synthèse du point de vue environnemental, légal, sociologique et de l'évaluation régionale du potentiel. Elle permet le choix d'une zone préférentielle d'implantation d'éoliennes. Les données de potentiel éolien issues de l'évaluation régionale proviennent de modèles d'interpolation des données statistiques de vent issues du traitement de plusieurs dizaines d'années de données du réseau météorologique. Ces modèles permettent, à terre, l'obtention des cartes de potentiel éolien à petite échelle spatiale (haute résolution spatiale).

La phase de siting comprend l'analyse fine de la zone sélectionnée [21], permettant par exemple l'optimisation du placement des machines. Cette phase consiste en l'implantation d'un mât de mesure sur le site, de façon à en évaluer les caractéristiques fines à différentes altitudes et de connaître les micro-variations de la ressource éolienne ainsi que le comportement du profil de vitesses de vent. Ceci implique une campagne de mesure de longue durée mais offre la certitude d'une bonne connaissance du site.

4.3 Le temps de l'exploitation et de la maintenance

Le maître d'ouvrage et ses partenaires bénéficient d'une expérience reconnue en matière de conduite et de supervision de parcs éoliens, à terre comme en mer. Ils disposent également d'une stratégie de maintenance et d'une organisation interne bien maîtrisées. Forts de ces savoir-faire,

ils fondent leur stratégie d'exploitation et de maintenance sur trois axes principaux :

l'identification et la maîtrise des risques (qualité, santé, sécurité, environnement), l'optimisation continue de la production et la maîtrise des coûts.

Les activités d'exploitation et de maintenance du parc seront réalisées par une centaine d'ingénieurs, de techniciens et de marins...

Le maître d'ouvrage prévoit de créer un centre pour l'exploitation.

Un centre d'exploitation technique sera créé et appelé à fonctionner 24h/24 et 7j/7, en lien avec l'ingénierie et la maintenance pour optimiser la planification des interventions. Il permettra d'assurer la supervision de plusieurs parcs éoliens en mer. Sa localisation n'est à ce jour pas encore fixée et nécessite la réalisation d'études technico-économiques. Les équipes d'exploitation seront en charge de la surveillance du parc, de l'analyse de premier niveau, de la localisation du personnel, du contrôle d'accès aux éoliennes et de la coordination des activités. Les équipes de gestion financière et réglementaire seront quant à elles en charge du suivi administratif des parcs.

Une base de maintenance dédiée au projet est prévue sur le port de Caen-Ouistreham, à proximité immédiate du parc éolien, avec des équipes de maintenance préventive et corrective.

Les activités de maintenance concernent les interventions et le transport en mer ainsi que les activités de gestion, d'administration et de support technique aux activités en mer.

Selon les conditions météorologiques, les déplacements des techniciens s'effectuent par navire ou par hélicoptère, afin d'assurer des conditions de sécurité optimales.

Il est envisagé d'amarrer près de la base de maintenance les navires utilisés pour transférer le personnel. Plusieurs types de navires sont à l'étude (monocoque, catamarans). Ils doivent pouvoir transporter 12 passagers et environ 4 tonnes de charge utile. D'une vitesse moyenne de 20 noeuds, ils sont en mesure d'atteindre chacune des éoliennes du parc en une heure environ depuis le port de Caen-Ouistreham.

4.3.1. Maintenance préventive

Les opérations de maintenance préventive consistent à contrôler à échéances régulières les éoliennes, pour leur assurer une disponibilité optimale. Planifiées et réalisées selon les spécifications des fournisseurs des composants de l'installation (éolienne, fondation, poste

électrique, câbles), elles incluent notamment : la lubrification des composants, l'inspection des matériels de sécurité, des équipements basse et haute tension et des capteurs, le remplacement des filtres et des consommables, la vérification du serrage au couple des éléments de fixation de la structure. Le plan de maintenance spécifique d'une éolienne définit les opérations à réaliser et leur fréquence. Chaque opération est accompagnée d'une feuille d'instructions définissant les procédures à suivre.

Les opérations de maintenance préventive ne nécessitent pas de moyens logistiques lourds. Elles sont réalisées une fois par an, à raison d'une équipe de six personnes par éolienne pendant une durée moyenne de cinq jours de travail, soit 250 heures par éolienne environ. Pour des raisons de sécurité, les éoliennes sont arrêtées pendant les interventions et sont opérationnelles en dehors des plages horaires de travail des équipes, la nuit en particulier. Afin d'optimiser les conditions de travail et de minimiser les pertes de production, les interventions sont planifiées pendant les périodes de vent et de houle faibles (généralement au printemps et en été). D'autres opérations de maintenance préventive, plus spécifiques, sont prévues tous les 2 à 5 ans pour quelques équipements, par exemple le remplacement des systèmes de refroidissement du convertisseur, tous les 5 ans.

4.3.2. Maintenance corrective légère

La maintenance corrective légère correspond aux inspections de contrôle en cas de détection d'anomalie (température, vibration, pression, etc.) et à la réparation de pièces pouvant être manipulées à l'aide des grues, d'une capacité maximale de levage de deux tonnes, installées sur chaque éolienne (sur la plateforme de transition au bas de l'éolienne et dans la nacelle). Ces interventions, nécessitant une équipe de trois à quatre techniciens par éolienne, durent en moyenne deux à quatre heures, périodes pendant lesquelles les éoliennes sont arrêtées. En cas de mauvais temps rendant impossible le transfert des équipes par navire, des hélicoptères d'une capacité de 3 à 5 passagers pourront être utilisés, si la visibilité le permet. L'accès des techniciens à l'éolienne sera assuré par treuillage.

4.4. Evaluation du bruit généré par les éoliennes

Elle est composée de plusieurs éléments (rotor formé de pales, nacelle renfermant l'éolienne toute la partie mécanique de la machine, et mât). Les éoliennes implantées en Europe sont généralement à trois pales fixées sur un axe horizontal, en amont de la nacelle. D'autres modèles existent à deux pales, rotor en aval de la nacelle, certaines plus rares sont à axes vertical.

Dans tous les cas, le bruit d'une éolienne résulte de la contribution sonore de plusieurs sources de bruit (mécaniques et aérodynamiques). Les évolutions technologiques mènent à des modèles de puissance électrique unitaire, donc de taille, de plus en plus grande. Les puissances installées par parc sont également à la hausse.

De par des distances d'éloignements entre sources de bruit et riverains supérieures à 300 m, le bruit des éoliennes repose sur une problématique de propagation acoustique à grande distance. Pour de telles distances, outre la divergence géométrique (décroissance du son en fonction de la distance), d'autres facteurs influents entrent en jeu : absorption atmosphérique, effet de relief, effet de sol, conditions météorologiques sur la courbure des rayons sonores. Certains de ces facteurs sont en interactions. Par exemple, les conditions météorologiques influent sur la courbure des rayons sonores, ce qui, selon le rayon de courbure, peut entraîner un contournement du relief qui rend les éoliennes non visibles physiquement mais visibles « acoustiquement ».

Contrairement à des bruits industriels, les émissions sonores des éoliennes varient au cours du temps et en fonction des vitesses de vent. Il est en de même pour le niveau de bruit de fond. Selon la zone dans laquelle se situe l'habitation et l'environnement qui l'entoure (zone rurale, zone industrielle, proximité d'axes routiers, présence de végétation, etc.), les ambiances sonores varient de plusieurs dizaines de décibels. L'émergence, différence entre le bruit ambiant et le niveau de bruit résiduel, sera donc variable.

Cette variabilité des niveaux sonores nécessite une expertise approfondie afin de cerner le Comportement des ambiances sonores dans le temps, en fonction des conditions de vent, des saisons, etc. Afin de simplifier cette expertise, la détermination d'un critère de distance minimale d'éloignement des éoliennes par rapport aux habitations a souvent été évoquée.

Mais cet exercice est hasardeux et jamais satisfaisant. Il entraîne selon le critère envisagé, une surestimation ou une sous-estimation de l'impact acoustique du projet, empêchant ou favorisant le développement de l'éolien sans pouvoir toujours répondre aux exigences réglementaires.

4.4.1. Facteurs de bruit

4.4.1.1 Bruits d'origine mécanique

Le bruit mécanique provient du fonctionnement de tous les composants présents dans la nacelle. Les principaux composants générateurs de bruit sont le multiplicateur (sauf certains modèles récents), les arbres, la génératrice les équipements auxiliaires (systèmes hydrauliques, unités de

refroidissement). Le bruit émis est en large bande mais contient également des tons purs en relation avec les parties tournantes.

Les premières générations d'éoliennes émettent un bruit mécanique relativement important.

Les éoliennes plus récentes ont bénéficié de nombreuses améliorations ce qui a permis de réduire de moitié le bruit d'origine mécanique. Les améliorations ont porté sur le traitement acoustique de la nacelle : renforcement de l'isolation, mise en place de silentbloks, traitement des voies d'air par des silencieux, fabrication de multiplicateurs et de génératrices spécifiques.

4.4.1.2 Bruits d'origine aérodynamique

Tout obstacle placé dans un écoulement d'air émet du bruit. La tonalité de ce bruit dépend de la forme et des dimensions de l'obstacle ainsi que de la vitesse de l'écoulement. Plus l'obstacle est vif, plus la tonalité est marquée.

L'écoulement d'air peut également faire vibrer les surfaces. Dans l'industrie automobile, les exemples sont multiples (rétroviseur, portière, toit, capot, ...).

De nombreuses études (Fégeant, 2001 ; Danish Wind Industry Association) ont été menées pour mettre en relation la vitesse de l'écoulement avec le bruit émis. Tous les autres paramètres restant égaux, la pression sonore augmentera avec la puissance cinquième de la vitesse de la pale par rapport à l'air ambiant. C'est pourquoi la vitesse de rotation des éoliennes modernes, avec de grands diamètres de rotor, est très lente.

Tous ces bruits aérodynamiques sont dus à la présence de turbulences ou tourbillons dont

Les origines sont multiples (cf. figure 17).

1-Présence de salissures ou d'imperfections sur le profil de la pale (trous, aspérités, fissures, ...)

2-Turbulences liées au passage de l'air sur le côté intrados et extrados de la pale qui se rejoignent pour créer des turbulences sur le bord de fuite

3-Tourbillons en bout de pale dus aux surpressions / dépressions présentes dans cette zone

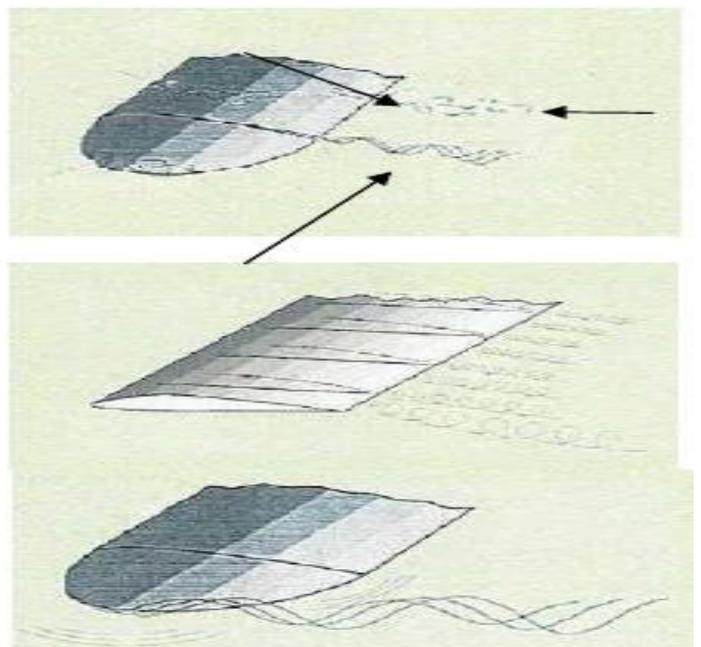


Figure 17: Origine des turbulences

4.5. Conception d'un système éolien autonome

C'est un système de petite taille, non connecté au réseau, peut être autonome, s'il fournit que l'électricité provenant de la conversion de l'énergie éolienne, ou hybride, s'il fournit de l'électricité provenant de l'énergie éolienne, ainsi que d'une autre source qui remédie au manque de vent. Ce sont des systèmes de puissance allant de 10 kilowatts à 50 kilowatts. [23],[22]

La capacité de ces systèmes est suffisante pour assurer l'approvisionnement en électricité d'une installation donnée.

4.5.1. Evaluation du site

La connaissance du site d'implantation d'un système éolien passe obligatoirement par l'estimation et l'évaluation de la quantité d'énergie éolienne disponible. En principe la vitesse annuelle moyenne du vent devrait être supérieure à 15 km/h, soit 4 m/s, pour que l'on puisse envisager l'installation d'un système éolien.

La mesure de la vitesse nous aidera à déterminer la taille de l'éolienne et la capacité de stockage des batteries pour répondre aux besoins énergétiques.

4.5.2. Evaluation des besoins en énergie

C'est la détermination de la quantité d'énergie dont on a besoin pour faire fonctionner les appareils à alimenter. Il s'agit en fait de :

- Déterminer pendant combien d'heures fonctionnent nos appareils,
- Déterminer la quantité d'énergie que consomme chacun d'eux en watts.

4.5.3. Taille de l'éolienne et de la tour à installer

Connaissant la quantité d'énergie éolienne disponible à l'endroit choisi, ainsi que la quantité d'énergie dont on a besoin, on peut déterminer la taille de l'éolienne en essayant de faire correspondre ces deux valeurs.

Ensuite on choisit le pylône d'une hauteur à définir pour exposer le générateur éolien à une fourniture d'une énergie plus importante. Ce pylône coûterait cher.

4.5.4. Calcul de la capacité de stockage des batteries

La capacité des batteries se mesure en ampères-heures. On doit donc calculer le nombre d'ampères heures que les batteries doivent fournir pendant les journées où le vent n'atteint pas la valeur minimale.

La procédure de calcul de ce stockage énergétique est la suivante : [24],[22]

- Calculer la quantité journalière d'énergie à utiliser. Soit E cette énergie exprimée en Wh,
- Calculer le nombre de jours où le vent n'atteint pas sa valeur minimale. Soit n ;
- Calculer la quantité d'énergie que doivent fournir les batteries pendant ces jours. Soit E_b , exprimée en Wh :

$$E_b = E \times n$$

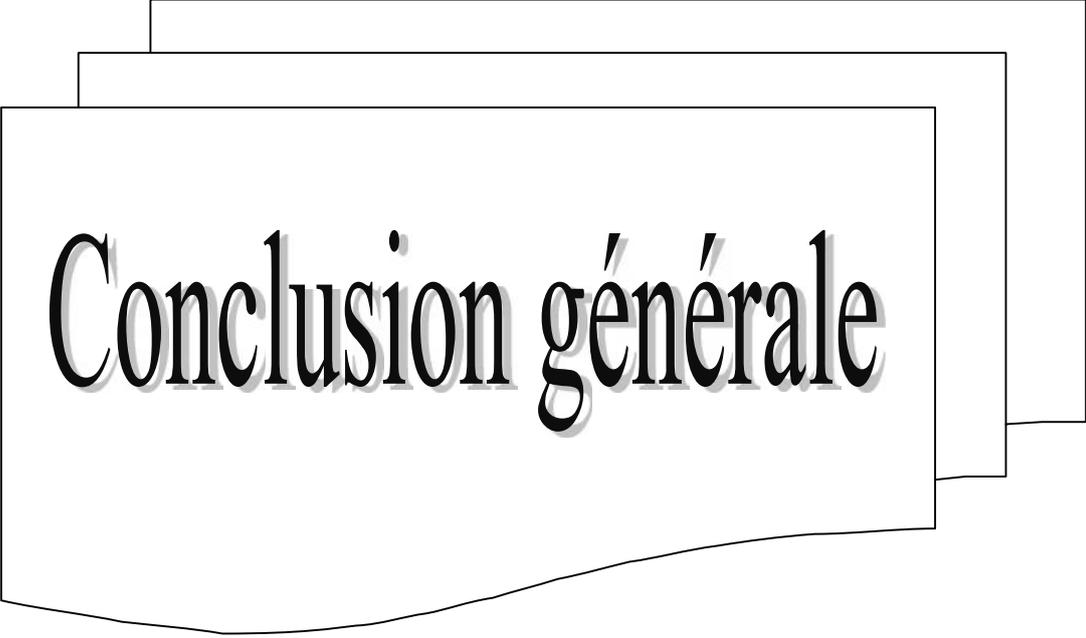
- Calculer le nombre d'ampères-heures nécessaires, en divisant E_b par la tension des batteries V_b . Soit C_b :

$$C_b = E_b / V_b$$

La capacité des batteries nécessaire pour répondre aux besoins, quelque soit le profil de charge, est égale au double de la capacité calculée C_b , puisqu'on ne peut soutirer plus de 50, si l'on veut éviter qu'elles ne déchargent excessivement.

4.6. Conclusion

Nous avons appliqué les principes de la maintenance préventive ainsi que correctionnel sur un parc d'éolienne. Une application d'un cas réel a été réalisée et avec ce processus de maintenance on peut garantir un meilleur fonctionnement et une durabilité certaine.



Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent la conception d'un plan de maintenance pour un parc éolien.

La ressource globale en énergie renouvelable est très importante et peut contribuer de manière significative à la fourniture d'électricité au niveau mondial.

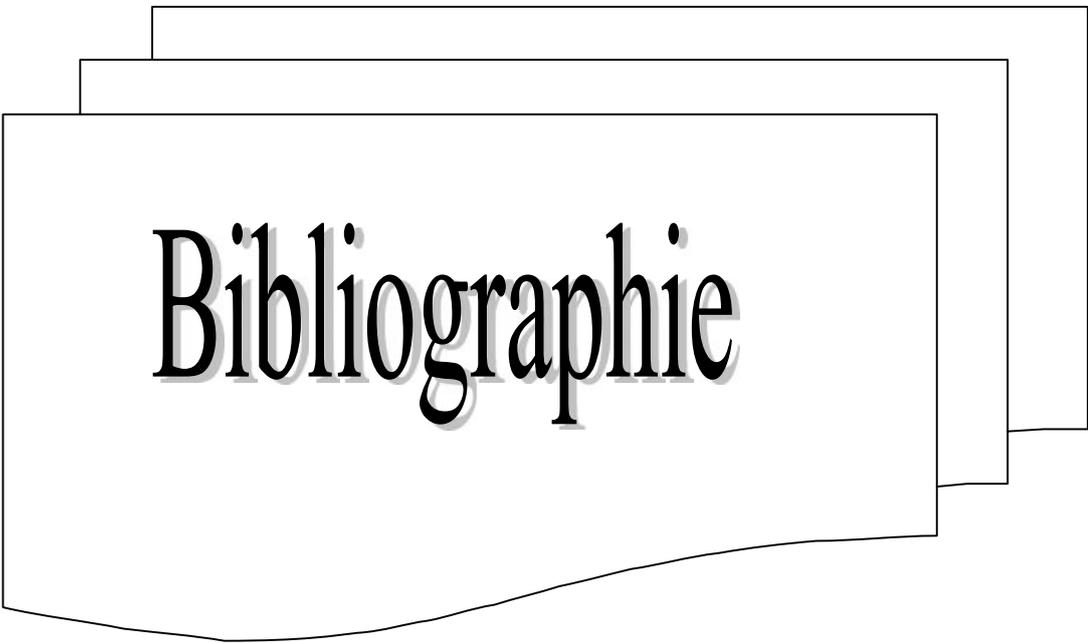
Donc nous avons étudié dans la première partie les différents types de l'énergie renouvelable.

Les énergies renouvelables ont un attrait certain lorsqu'on considère.

Après nous avons vu dans la deuxième partie l'énergie éolienne et les différents types d'éolienne et le principe de fonctionnement.

Puis nous avons étudié l'importance dans le parc et l'entreprise et le rôle de la maintenance industrielle.

Et dans la dernière partie nous avons appliqué les principes de la maintenance sur un parc d'éolienne. Avec ce processus de maintenance on peut garantir un meilleur fonctionnement et une durabilité certaine.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] Robert Bell, La bulle verte : la ruée vers l'or des énergies renouvelables, Paris, Scali, 2007, 296 p.
- [2] Sven Geitmann, Énergies renouvelables & Carburants alternatifs, Hydrogeit Verlag, août 2007
- [3] AllWeWish.org, les alternatives au nucléaire
- [4] Joule Unlimited Claims It Can Make Diesel Fuel With Sun, Water & CO₂, JAY LINDSAY, 27 février 2011
- [5] Science et Vie, juillet 2009, n° 1102
- [6] Arnaud Guiguitant, « L'Indonésie mise sur l'électricité géothermique », dans Le Monde du 25-10-2009, [lire en ligne [archive]], mis en ligne le 24-10-2009 .
- [7] Énergie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, , Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.

- [8] Désiré Le Gourières. *Énergie éolienne théorie, conception et calcul pratique des installations*. ,Ed :Eyrolles.

- [9] Guy Cunty *.Éoliennes et aérogénérateurs*. Guide de l'énergie éolienne, Ed : Edisud Technologies douces.

- [10] L. Hamane. *Les Ressources Éoliennes de l'Algérie*. Bulletin des Énergies Renouvelables, (Juin 2003), N°3 PP 10-11.

- [11] A. Benlemih. *Promotion of the electricity produced from wind mills and preparation of an adapted regulatory. Framework, Casablanca*. e-mail: benlemih@one.org.ma

- [12] http://www.umc.edu.dz/vf/images/cours/maintenances_industrielle.pdf.

- [13] Maintenance industrielle de l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté – jean – Marie AUBERVILLE Ellipses Edition Marketing – Paris, 2004.

- [14] Souris J.P la maintenance source de profits. paris- les éditions d'organisation, 1990.

- [15] Les cours de Sami Bellah. [http://www. Technologuepro.com/ mécanique/ Etude de systèmes hydrauliques généralités de maintenance pdf](http://www.Technologuepro.com/mécanique/Etude_de_systèmes_hydrauliques_généralités_de_maintenance.pdf).

- [16] Maintenance/ les mots de la maintenance industrielle, English-French, dictionary for the maintenance professional/ Dictionnaire anglais- français pour la professionnel de la maintenance, CERAV. Paris octobre 2009.
- [17] <http://www.ademe.fr/bretagne/actionsphares/energiesrenouvelables>, « Les actions phares de la délégation en Bretagne de l'A.D.E.M.E ».
- [18] O. Langlois, « Raccordement d'éoliennes de petite puissance intégrées au bâtiment », », Contrat avec EDF R&D, DEA Génie Electrique de l'INPT, Septembre 2002.
- [19] <http://www.windturbin.com>
- [20] H. Garrad & partners, , Tractebel Energy Engineering, Risoe National Laboratory, Kvaerner Oil & Gas, Energi & Miljoe Undersoegelser, "Offshore Wind energy. Ready to power a sustainable Europe, Final Report. Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe," Delft University Wind Energy Research Institute (DUWIND), Delft, Pays-Bas, Réf: DUWIND 2001.006, 2001.
- [21] I. Troen et E. L. Petersen, European Wind Atlas. Laursen Toender ed., Danemark, 1989, ISBN 87-550-1482-8, pp. 656.
- [22] L.Louis and J.R.Bucciarelli. *The effect of day to day correlation in solar radiation on the probability of loss of power in a stand alone photovoltaic energy system.solar energy*, (1986) vol 36, N° .1, pp: 11-14.
- [23] **Wind power:** www.windpower.org.
- [24] R. Chedid and S. Rahman. *Unit sizing and control of hybrid Wind-solar power systems.Energy conversion*, IEEE Transactions on, (1997), Vol 12 N° 1, pp: 79–85.