

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Technologies

Filière: Génie mécanique

Spécialité: Energies renouvelables

Thème

Etude de la résistance à la corrosion d'un acier utilisé à la fabrication du mat d'éolienne

Devant le jury composé de :Présenté par :

MENCER Nouredin

Président

REGUIGUE AHMED

KHACHANA Mohammed

Examineur

KEHILI ABDERRAHIM

BOUSBIA Saifeddin

Examineur

KHENNOUFA KHALED

Dr. BOULIFA M.Ilias

Encadreur

HAMMI ABDENNACER

Année Académique 2021-2022

Dédicace

À mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien tout au long de mes études

À mes chères sœurs et frères pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral

À nos pères qui sont morts avant d'avoir partagé notre joie.

“ Hammi Med El-hadi , Reguiguelakhdar “ qu'Allah lui accorde dans son vaste paradis.

Remerciements

*Nous remercions ALLAH le tout puissant de
m'avoir donnée le courage, volonté et la patience de
mener à terme le présent mémoire*

*La présentation de ce modeste travail nous donne
l'occasion d'exprimer notre profonde gratitude au
Dr. Boulifamediliasse, Maître de conférences à
l'Université d'el oued pour ce travail pendant toute
la durée de l'expérimentation*

TABLE DES MATIERES

Dédicace

Remerciements

Sommaire

Liste de tableaux

Liste de figures

Introduction

Chapitre I

ETUDE D'EOLIENNE

I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur les systèmes éolien.....	3
I.3 Définition De L'Energie Eolienne	3
I.3.1 Descriptif une éolienne	4
I.4 Principaux Composants d'une Eolienne	5
I.5 Le Principe de Fonctionnement d'une Eolienne	7
I.6 les Différents types d'éoliennes.....	7
I.6.1. Éoliennes à axe vertical.....	8
I.6.1.1. Les Avantage / les Inconvénients	8
I.6.2. Les éoliennes à axe vertical.....	9
I.6.2.1. LES AVANTAGE / LES INCONVENIENTS :	10
I.7 Régulation Mécanique de La vitesse d'une Eolienne	11
I.9. Avantages et Inconvénients de L'Energie Eolienne	12
I.9.1. Les Avantages :.....	12
I.9.2. Les Inconvénients :	12
I.10 Conclusion.....	13

[Toc105584559](#) Chapitre II

MATERIAUX UTILISE DANS D'EOLIENNE

II.1. Introduction.....	15
II.2. Classification des matériaux	15
II.3. Matériaux la fabrication.....	16

II.3.1. Matériaux pour fabrication du mat	16
II.3.1.1. Les métaux	16
II.3.1.1.1. Aciers	16
II.3.1.1.2. Fontes	18
II.3.2. Matériaux pour la fabrication des pales	20
II.3.2.1 Aluminium	21
II.3.3. Matériaux pour la fabrication des nacelles	21
II.4. Conclusion	21

Chapitre III

CORROSION ET PROTECTION CONTRE LA CORROSION

III.1 Introduction.....	23
III.2 Formes de corrosion	23
III.2.1 La corrosion uniforme	23
III.2.2 La corrosion galvanique	24
III.2.3 La corrosion caverneuse	24
III.2.4 La corrosion par piqûres	25
III.2.5 La corrosion inter granulaire.....	25
III.3 Réactions électrochimiques	26
III.4 Interface métal/solution	26
III.5 Processus faradique et non faradique	26
III.6.1 Diagramme potentiel-pH du fer	28
III.6.2 Cinétique électrochimique d'un système mixte	29
III.7 Causes de la polarisation	29
III.7.1 Polarisation de concentration.....	30
III.7.3 Polarisation d'activation	30
III.8 Protection contre la corrosion	30
III.8.1 Mesures préventives	30
III.8.1.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux	31
III.8.1.2 Protection par une forme adaptée des pièces	31
III.8.2.1 Protection par revêtements.....	31
III.8.2.1.1 Revêtements métalliques	32
III.8.2.1.2 Revêtements non métalliques.....	32
III.8.2.2 Protection électrochimique	33
III.8.2.2.1 La protection cathodique.....	34
III.8.2.2.2 La protection anodique	34
III.9 Conclusion	34

Chapitre IV
TRAVAIL EXPERIMENTAL

VI.2. Méthodes expérimentales	37
IV.2.1. Perte de Masse	37
IV.2.2. Etude électrochimique	38
IV. 3. Résultats et discussion.....	40
IV.3.1. Perte de Masse	40
IV.4. Conclusion :	43
Conclusion/perspectives	50
Références	55
Résumé	

LISTE DE TABLEAUX

Liste de tableaux

N	TITRE	PAGE
II.1	Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux usuels	17
III .1	Types de revêtements.	31
IV .1	Le tableau montre la masse (g) des échantillons avant d'être placés dans la solution	37
IV .2	Un tableau indiquant le temps (min) pendant lequel chaque échantillon a été placé dans la solution	37
IV .3	concentration (mol) et volume (litre)	37
IV .4	Masse échantillons avant émergence en solution	39
IV .5	Masse de l'échantillon après émergence dans la solution	40
IV .6	Tableau montrant l'aire des cinq côtés de l'échantillon	40
IV .7	Tableau montrant le taux de corrosion	41

LISTE DE FIGURES

Liste de figures

N	TITRE	PAGE
I .1	Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur	04
I .2	Eléments d'une nacelle	05
I .3	Rotor d'une turbine	06
I .4	Tour d'une turbine	07
I .5	Éolienne de type Darrieus et Savonius	08
I .6	Configuration à axe horizontal	10
I .7	diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent. La plupart	11
II .1	Principales familles de matériaux	16
III .1	corrosion uniforme	23
III .2	corrosion galvanique	24
III .3	corrosion caverneuse	24
III .4	corrosion par piqures	25
III .5	corrosion inter granulaire	25
III .6	Corrosion du fer dans l'acide sulfurique contenant de l'oxygène dissous	26
III .7	Modèles de la double couche de l'interface métal-solution	27
III .8	Diagrammes potentiel-pH du fer dans H ₂ O (T = 25°C)	28
IV .1	Balance KERN utilisé	36
IV .2	Voltalab	38
IV .3	Cellule d'expérience	38
IV .4	Électrode de travail	39
IV .5	corrosion survenue sur l'échantillon après son extraction de la solution	40
IV .6	Obtenu après avoir placé l'électrode de travail dans la solution	41
IV .7	Graphe montrant la capacité et la double couche de corrosion	42
IV .8	Changement de Couleur Electrode de travail après l'opération	42

INTRODUCTION

1

Introduction

L'énergie renouvelable est générée par des ressources naturelles qui ne s'épuisent jamais et peuvent être reconstituées indéfiniment, telles que le vent, l'eau et la lumière du soleil, qui sont abondantes dans la plupart des régions du monde.

Elle peut également être créée en utilisant le mouvement des nuages et des vagues, ainsi que l'énergie géothermique et d'autres inventions. Elle fait principalement la distinction entre les combustibles fossiles tels que le pétrole, le carbone et le gaz naturel. Les énergies renouvelables, en général, génèrent des déchets issus de la combustion d'énergies fossiles qui sont nocifs pour l'environnement, comme ceux qui contribuent au réchauffement climatique, comme le dioxyde de carbone (CO₂). L'utilisation de biocarburants pour générer de l'énergie à partir de matières végétales est une exception, car si leurs déchets contribuent au réchauffement climatique, ils peuvent être durables, et l'Union européenne et les Nations unies les considèrent comme une source d'énergie renouvelable. De plus, les énergies renouvelables n'incluent pas l'utilisation du combustible nucléaire, qui élimine les résidus atomiques nocifs produits par les réacteurs. Une éolienne est une turbine qui transforme l'énergie cinétique du vent (énergie éolienne) en électricité. On peut également parler d'aérogénérateur. On appelle parc éolien ou ferme éolienne le lieu où plusieurs éoliennes sont rassemblées. Le vent actionne les pales. Cette rotation fait tourner le rotor de l'alternateur, ce qui produit donc de l'énergie électrique. En général, il suffit d'un vent d'une dizaine de kilomètres à l'heure pour mettre les pales en mouvement.

Notre travail dans cette thèse est divisé en quatre sections :

Dans le premier chapitre, nous aborderons les éoliennes en général, leurs composants et caractéristiques, ainsi que le principe de base qui régit leur fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons aux composants et composantes du vent atmosphérique, en particulier la bouche, qui fait l'objet de nos recherches.

Au chapitre trois, nous verrons les risques d'usure du mât dus aux facteurs environnementaux, ainsi que la manière de le protéger.

Au chapitre quatre, nous parlerons de deux expériences de corrosion différentes.

La première est l'utilisation d'une solution chimique et la seconde est l'utilisation du courant électrique.

CHAPITRE I :

ETUDE D'EOLIENNE

I.1 Introduction

L'énergie éolienne est de plus en plus utilisée pour produire de l'énergie électrique.

Dans le cas de l'utilisation en centrales autonomes, différentes machines électriques peuvent assurer la conversion électromécanique en tant que génératrice. Toutefois, pour des raisons de fiabilité, robustesse et prix de revient, la machine asynchrone à cage d'écureuil demeure largement répandue [1].

I.2 Généralités sur les systèmes éolien

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masse d'air qui est du indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre une différence de pression est créé et la masse d'air est en perpétuel déplacement

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, etsurtout en corrélationsaisonnière(l'énergie électriqueest largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité.

- **L'énergie éolienne est propre :** Il n'y a pas de pollution causée par les éoliennes. Elle ne libère aucune substance dangereuse dans l'environnement et ne fait aucun mal.
- **L'énergie éolienne est prometteuse :** Le coût de l'énergie éolienne est désormais le plus bas de toutes les sources d'énergie renouvelables
- **L'énergie éolienne est la source d'énergie renouvelable la plus fiable :** une éolienne a un taux de disponibilité matérielle de plus de 98%. [3]

I.3 Définition De L'Energie Eolienne

les éoliennes ayant fait de gros progrès depuis une dizaine d'années (plus 55% en productivité, moins 50% en niveau de bruit) [4].

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique [5].

Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de force moyennes fréquemment rencontrées. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h). Au-delà

d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes [6].

I.3.1 Descriptif une éolienne

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production

D'énergie mécanique ou électrique [7].

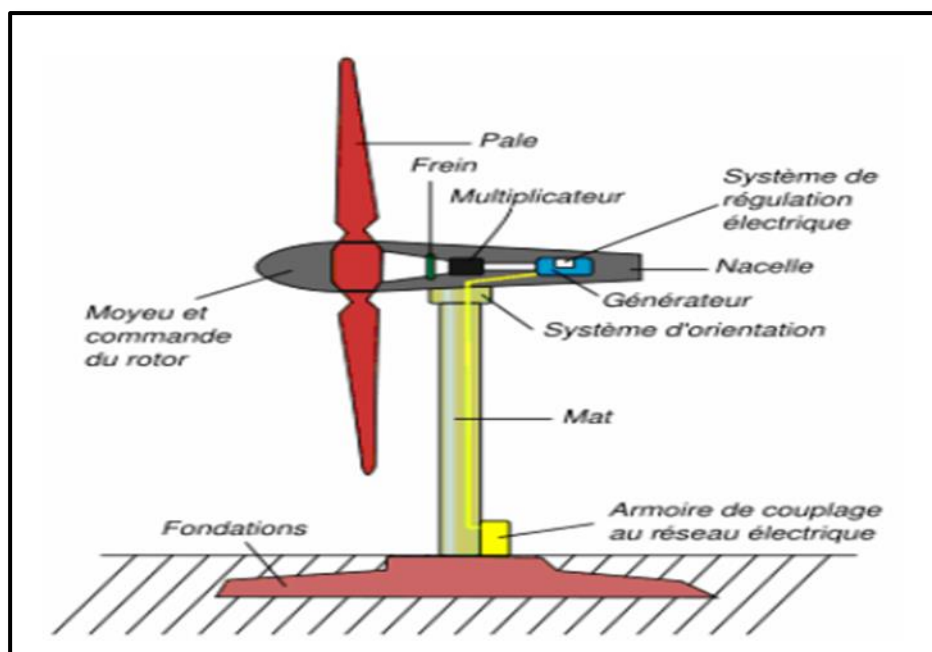


Figure I. 1 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

Les éoliennes possèdent également une girouette qui permet d'orienter les pales en fonction de la direction du vent. Il doit également être solidement fixé au sol.

Les éoliennes possèdent également une girouette qui permet d'orienter les pales en fonction de la direction du vent.

S'agissant du mât. Les éoliennes doivent s'adapter au site et à ses exigences. Il est nécessaire de vérifier la vitesse du vent; Le site est considéré comme utilisable lorsque la vitesse minimale du vent est de 4 m/s et la hauteur du sol est de 10 m. La "fente" donnée est nécessaire pour l'installation d'une éolienne, mais le coût d'un relevé précis avec un anémomètre peut être élevé. Il faut que cela corresponde au coût total de votre projet.

Ce potentiel conditionnera le choix d'une machine de puissance nominale adaptée. Un autre critère important reste l'évaluation de ses besoins en électricité au regard de ces

consommations journalières et annuelles. Pratiquement, c'est beaucoup plus complexe : les éoliennes doivent résister à des tempêtes aussi violentes que celles que nous connaissons en Bretagne. Les principaux avantages de l'énergie éolienne sont l'autonomie en électricité, la possibilité de produire de jour comme de nuit et un impact environnemental réduit par des précautions simples vis à vis de la population et du paysage. L'énergie produite peut être soit stockée dans des batteries, soit injectée aux normes dans le réseau. Cette dernière solution étant économiquement et techniquement beaucoup plus pertinente [8].

I.4 Principaux Composants d'une Eolienne

- **La nacelle:**

C'est la partie l'essentielle de l'éolienne, elle contient les éléments de transmission mécanique entre le rotor et le générateur, aussi comprenant le multiplicateur et le système de freinage de sécurité ainsi que les équipements de mesures du vent. [9].

La (Fig. I.2) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants:

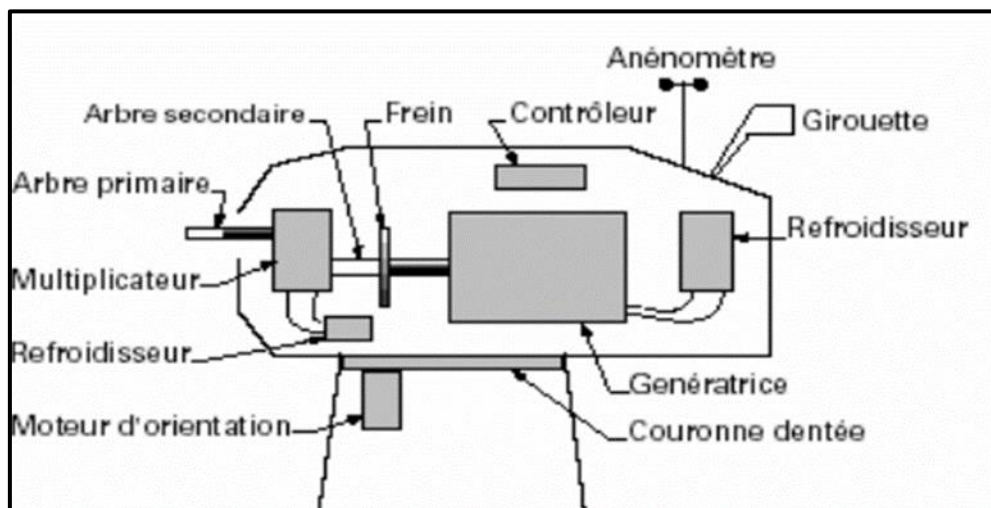


Figure I. 2 : Eléments d'une nacelle [16]

- **Le rotor :**

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. [10].



Figure I. 3 : Rotor d'une turbine

Pendant un tour, le rotor équilibre un disque en rotation, captant l'énergie des molécules d'air qui le traversent. La surface d'un plateau tournant est de :

$$A = \pi r^2 = \pi (1/2 d)^2$$

Où r est le rayon du disque circulaire, d est le diamètre et π est ($\pi = 3,1415...$) [10].

- **Le mât :**

Généralement en métal, il supporte tous les équipements utilisés dans la production d'électricité (nacelle + rotor).

Il est soutenu par une fondation lourde encastrée dans le sol.

semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne [10].



Figure I. 4 : Tour d'une turbine

I.5 Le Principe de Fonctionnement d'une Eolienne

Le rotor tourne sous l'influence du vent. L'axe principal de l'éolienne fait fonctionner un générateur de courant alternatif qui génère de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (12 à 15 tr/min) doit être augmentée d'un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/min, qui est la vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. La tension électrique produite par l'alternateur, qui va de 600 à 1 000 volts, est ensuite augmentée par un entraîneur de puissance situé dans la nacelle ou à l'intérieur du moteur, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 kV.

La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être reconvertie, en fonction de la tension à laquelle la centrale est raccordée au réseau public. En France, la tension de raccordement des éoliennes de 10-15 MW est généralement de 20 kV. Pour les postes de plus grande capacité, la tension de raccordement peut être de 60 à 90 kV, voire 225 kV. Une vitesse de vent d'au moins 10 à 15 kilomètres par heure est nécessaire pour démarrer l'opération de l'éolienne. Dès que vous dépassez les 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence des vents supérieurs à 90 km/h est généralement faible.

I.6 les Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal [11]

I.6.1.Éoliennes à axe vertical

L'axe de rotation de ces capteurs est perpendiculaire à la direction du vent, et ce sont les premières constructions développées pour générer de l'électricité. Il est coupe-vent et ne nécessite pas de routeur. Deux d'entre eux se distinguent particulièrement : Savonius et Darrieus. Les éoliennes Savonius se composent principalement de deux demi-cylindres, chacun avec un axe différent. Il, comme les machines de badminton, est principalement propulsé par la traînée. Cette machine offre deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s

L'éolienne, inventée par le français Darrieus, est un rotor dont la forme ressemble le plus souvent au pied utilisé pour battre les œufs. Malheureusement, elle ne peut pas



démarrer seule.

Figure I.5 : éolienne de type Darrieus et Savonius [4]

I.6.1.1. Les Avantage / les Inconvénients

- **Les avantage :**

- Il est plus facilement accessible.
- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Sa conception est plus simple que l'éolienne à axe horizontal et nécessite peu d'entretien.

- Elle ne nécessite pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, ce qui est un avantage de construction non négligeable
- En fonctionnement, elle n'est pas soumise à des contraintes importantes sur les pales dues aux changements d'orientation.

- **Les inconvénients:**

- Ceux qui sont moins productifs.
 - Elle produit moins d'éoliennes horizontales, ce qui nuit à la rentabilité de son installation.
- En plus, ces éoliennes sont peu commercialisées dans le marché éolien des particuliers.
- Elle ne démarre pas automatiquement, il faut utiliser la génératrice comme moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne.
- Son rendement est faible et sont moins performances que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec des vents proches du sol, les vents sont donc très faibles dans la partie inférieure du rotor donc moins fort.

I.6.2. Les éoliennes à axe vertical

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur production est supérieure à celle de toutes les autres machines. On les appelle éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal et parallèle à la direction du vent. Ils ont souvent deux ou trois hélices ou plusieurs hélices pour pomper l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple. Deux groupes peuvent être distingués en fonction du nombre de pales qui composent l'hélice :

- **Les éoliennes à rotation lente “multi-pales” :**

Ils existent depuis un certain temps et sont principalement utilisés pour le pompage de l'eau.

- **Aérogénérateurs:**

Les éoliennes bi- ou tripolaires à rotation rapide sont aujourd'hui le type d'éolienne le plus populaire et sont principalement concernées par la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant « aérogénérateurs ».

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice

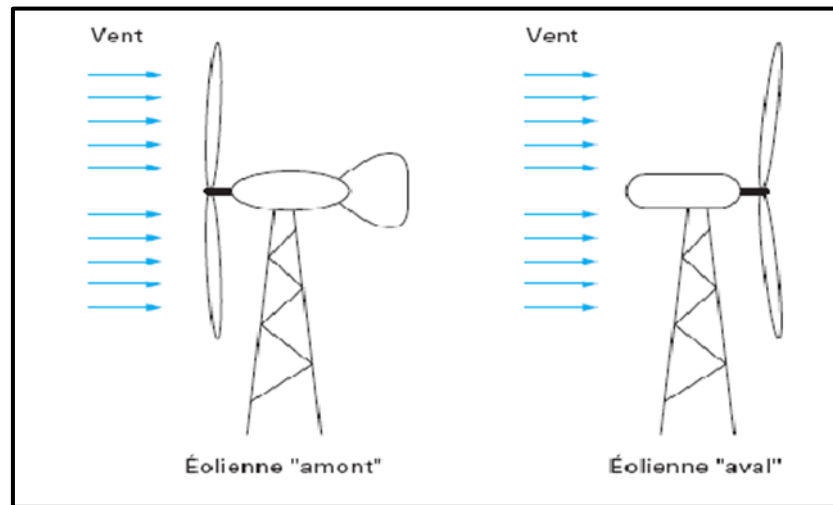


Figure I. 6 : configuration à axe horizontal [4]

au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent »

I.6.2.1. LES AVANTAGE / LES INCONVENIENTS :

- **Les avantages :**

- Ses gains sont élevés.
- Elle est équipée d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent.
- Elle est plus solide.
- Parce que ce style d'éolienne est plus répandu, il est plus facile de trouver un vendeur ou un installateur.
- - Parce que cette structure capte le vent à une altitude plus élevée, elle est plus forte et plus constante que le vent au niveau du sol.

- **Les inconvénients :**

- Moins résistante aux vents forts que l'éolienne verticale
- Une éolienne horizontale met plus de temps à s'activer qu'une éolienne verticale. En effet, elle doit se positionner par rapport à la direction du vent, ce qui retarde son activation. L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
- Elle fait beaucoup de bruit.
- Coût de construction très élevé.

I.7 Régulation Mécanique de La vitesse d'une Eolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que sa vitesse de rotation reste constante [12]

Selon l'équation (I-10), la puissance produite augmente à l'infini à mesure que la vitesse du vent augmente, ce qui n'est pas le cas dans la réalité.

Les caractéristiques de sécurité de la machine éolienne permettent de répartir la puissance sur différentes plages de vitesse du vent.

Où :

V_d : est la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolien commence à fournir de l'énergie.

V_n : la vitesse nominale.

V_m : la vitesse d'arrêt de la machine pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie Éolienne, pour les raisons de sureté de fonctionnement. Les vitesses V_n , V_d et V_m définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent : [12]

- **La zone 1** : où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas).
- **La zone 2** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_d .
- **La zone 3** : où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P turbine fournie reste sensiblement égale à P_n .
- **La zone 4** : dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie

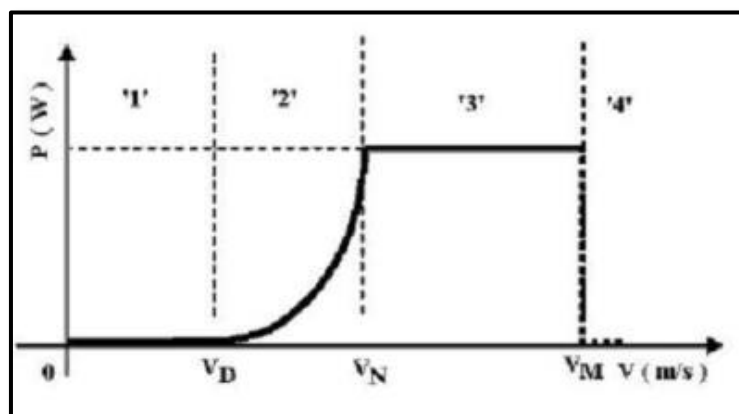


Figure I. 7 : diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent. La plupart

I.9. Avantages et Inconvénients de L'Energie Eolienne

I.9.1. Les Avantages :

L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [16], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [17].

- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable [18].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [19].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [15].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [20].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. [20].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [15].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres [15].
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [21].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [22], selon l'article [23] le coût de l'éolienne a diminué presque 90% depuis le début des années 80. [21].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer[20].
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [15].

I.9.2. Les Inconvénients :

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

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [20]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. [18].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [19], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). [18].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. [15].
- La source d'énergie éolienne étant stochastique [22], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [24]. Selon l'article de [25], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.10 Conclusion

L'utilisation du vent comme source d'énergie n'est pas un concept nouveau. Compte tenu de votre situation, il est tout à fait possible d'utiliser l'énergie solaire, au moins partiellement, pour produire votre propre électricité. Si l'énergie renouvelable n'est pas la seule source d'énergie à l'avenir, il y a de fortes chances qu'elle soit un pas en avant dans la production d'énergie renouvelable et à faible émission de carbone.

CHAPITRE II :

MATERIAUX UTILISE

DANS D'EOLIENNE

II.1. Introduction

Le mât est l'un des éléments structuraux les plus essentiels des éoliennes car il est constitué de métaux, qui sont un composant important des matériaux entrant dans leur fabrication, et c'est ce que nous allons voir dans ce chapitre car nous allons nous intéresser aux matériaux utilisés aux éoliennes.

II.2. Classification des matériaux

Les matériaux solides sont repartis en groupes : les métaux, les céramiques et les polymères. Une telle répartition repose essentiellement sur la structure atomique et la composition chimique de ces solides. La plupart des matériaux appartiennent à l'un de ces groupes, mais il existe aussi des matériaux dits intermédiaires. En outre, il existe autre type de matériaux synthétiques : les composites, les semi-conducteurs et les biomatériaux. [26].

- **- Définition**

Les matériaux de structure peuvent être classés en quatre grandes familles selon leurs compositions chimiques et structures atomiques (la nature des liaisons entre les atomes) [27].

On peut distinguer :

- Les métaux et alliages.
- Les céramiques et les verres.
- Les polymères.
- Les matériaux composites

La Figure II.1. Présente les principales familles de matériaux

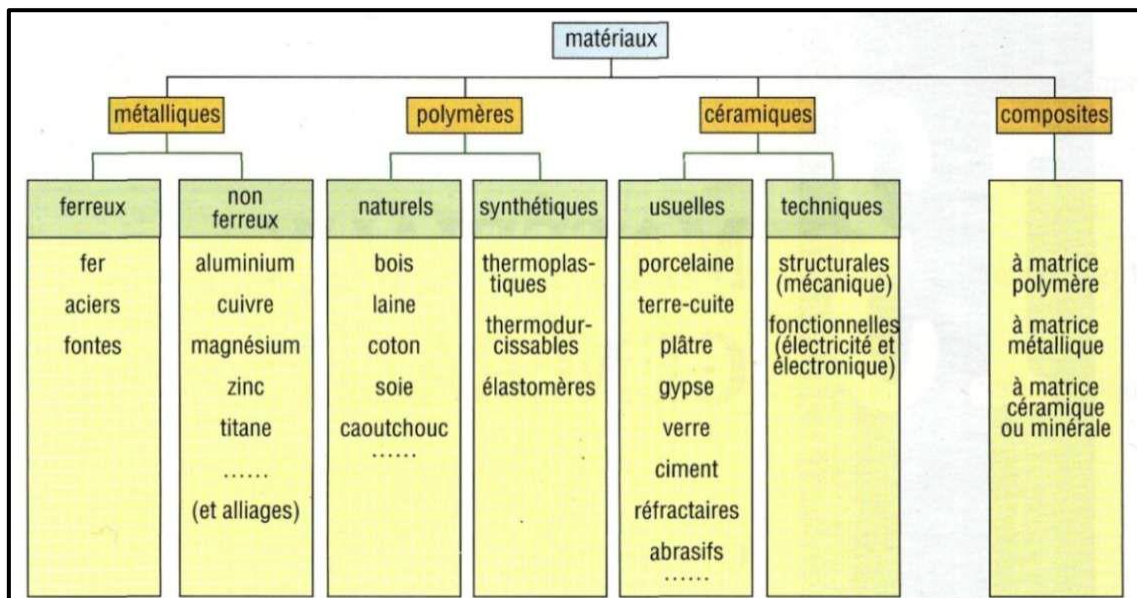


Figure.II.1. Principales familles de matériaux [27]

II.3. Matériaux la fabrication

II.3.1. Matériaux pour fabrication du mat

La maât est une suite d'opérations qui nécessitent la maîtrise de plusieurs processus. Le mode de fabrication diffère selon que le matériau est du métal ou du béton. Le mât d'acier est créé par le travail de tôles et de soudage, tandis que le mât de béton est créé en coulant le béton dans des coquilles. Le métal le plus couramment utilisé est l'acier.

En général, un mât est réalisé en trois tronçons différents pré-assemblés sur terre ou non en un seul élément. Le mât est réalisé à partir de tôles fortes qui sont roulées (de manière conique) puis soudées pour faire des viroles. Ces viroles sont soudées bout à bout pour réaliser les tronçons de mâts. Ensuite des brides sont soudées au bout de chaque tronçon pour pouvoir assembler les tronçons les uns aux autres. Ensuite le mât est protégé contre la corrosion avec une opération de sablage et des couches de peintures. Ensuite chacun des tronçons est équipé en chemin de câbles, moyens d'accès et systèmes de sécurité pour le rendre exploitable Réalisation d'un tronçon de mât acier[28].

II.3.1.1. Les métaux

Les matériaux métalliques sont utilisés par les entreprises de haute technologie car leurs propriétés ductiles, élastiques et résistantes permettent la création d'alliages de plus en plus performants. L'imaginaire collectif nous porte souvent à croire que les solides, contrairement aux gaz et aux liquides, sont inactifs. Les solides sont constitués d'atomes disposés dans des structures cristallographiques au niveau atomique. Cette disposition permet de réduire l'énergie générée par une telle structure tout en augmentant sa stabilité. Cependant, selon les atomes utilisés et le procédé utilisé pour façonner l'objet désiré, cette structure peut présenter différentes variations spatiales. Diverses propriétés émergent, ce qui piquera l'intérêt de l'industrie. [29].

II.3.1.1.1. Aciers

L'acier est un alliage ferreux additionné d'une petite quantité de carbone. La teneur en carbone a un impact significatif sur les propriétés de l'aluminium ; l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la durabilité de l'alliage. Les propriétés des aciers sont également altérées par l'ajout d'autres éléments, principalement des métaux, et on parle d'aciers alliés. De plus, les traitements thermiques ont le potentiel d'améliorer significativement leurs propriétés (notamment les trempes). Outre ces diverses potentialités, et par rapport aux autres alliages métalliques, le principal attrait des aciers est l'accumulation de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales telles que la résistance à l'effort (module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique), la durabilité,

<i>Corps</i>	<i>Symbole chimique</i>	<i>Symbole métallurgique</i>	<i>Densité</i>	<i>Corps</i>	<i>Symbole chimique</i>	<i>Symbole métallurgique</i>	<i>Densité</i>
<i>Aluminium</i>	<i>Al</i>	<i>A</i>	<i>2,7</i>	<i>Manganèse</i>	<i>Mn</i>	<i>M</i>	<i>7,2</i>
<i>Béryllium</i>	<i>Be</i>	<i>Be</i>	<i>1,85</i>	<i>Molybdène</i>	<i>Mo</i>	<i>D</i>	<i>10,2</i>
<i>Bore</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>2,35</i>	<i>Nickel</i>	<i>Ni</i>	<i>N</i>	<i>8,9</i>
<i>Cadmium</i>	<i>Cd</i>	<i>Cd</i>	<i>8</i>	<i>Phosphore</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>1,88</i>
<i>Carbone graphite</i>	<i>C</i>	<i>-</i>	<i>2,24</i>	<i>Platine</i>	<i>Pt</i>	<i>-</i>	<i>21,5</i>
<i>Carbone diamant</i>	<i>C</i>	<i>-</i>	<i>3,5</i>	<i>Plomb</i>	<i>Pb</i>	<i>Pb</i>	<i>11,3</i>
<i>Chrome</i>	<i>Cr</i>	<i>C</i>	<i>7,1</i>	<i>Silicium</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>4</i>
<i>Cobalt</i>	<i>Co</i>	<i>K</i>	<i>8,9</i>	<i>Soufre</i>	<i>S</i>	<i>F</i>	<i>2,4</i>
<i>Cuivre</i>	<i>Cu</i>	<i>U</i>	<i>9</i>	<i>Titane</i>	<i>Ti</i>	<i>T</i>	<i>4,5</i>
<i>Etain</i>	<i>Sn</i>	<i>E</i>	<i>6 à 7,5</i>	<i>Tungstène</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>19,3</i>
<i>Fer</i>	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	<i>7,8</i>	<i>Vanadium</i>	<i>V</i>	<i>V</i>	<i>5,9</i>
<i>Lithium</i>	<i>Li</i>	<i>L</i>	<i>0,53</i>	<i>Zinc</i>	<i>Zn</i>	<i>Z</i>	<i>7,15</i>
<i>Magnésium</i>	<i>Mg</i>	<i>G</i>	<i>1,75</i>	<i>Zirconium</i>	<i>Zr</i>	<i>Zr</i>	<i>6,5</i>

et résistance aux chocs (résilience). [29].

Tableau II.1. Symboles chimiques et métallurgiques, densité des métaux usuels

- **Classification de aciers**

a) Aciers non alliés

Ce sont les aciers au carbone dont la teneur varie entre 0,1 et 2,1%, mais pratiquement jusqu'à 1,7% seulement. Une augmentation de la teneur en carbone se manifeste par une augmentation de la limite d'élasticité, de la résistance à la traction et de la dureté. Au

contraire, les caractéristiques de plasticité diminuent. La soudabilité des aciers devient de plus en plus difficile[29].

b) Aciers faiblement alliés

Ils contiennent des éléments d'addition dont la teneur inférieure est déterminée individuellement pour chaque élément par une norme technique. Les teneurs supérieures sont toujours inférieures à 5 % (selon AFNOR). C'est du manganèse de construction, du manganèse chrome molybdène, du manganèse chrome manganèse, du manganèse chrome vanadium, etc... Ils sont créés dans le but d'obtenir des propriétés mécaniques ou technologiques uniques. Leur nom est dérivé de la teneur de l'élément d'addition préféré..

c)Aciers fortement alliés

Ils contiennent au moins un élément d'addition qui atteint la teneur de 5% (d'après AFNOR).Il s'agit d'une part des aciers de construction, d'autre part des aciers à outils. Ils sont élaborés pour l'obtention des caractéristiques mécaniques ou technologiques spéciales [31].

II.3.1.1.2. Fontes

En sidérurgie, la source est un alliage de fer riche en carbone contenant 1,7 à 6,67 % de carbone ; en dessous de ce pourcentage se trouvent les aciers et les fers industriels. Les fontes se distinguent des autres alliages par leur coulabilité supérieure (ce mot englobe l'inefficacité thermique et la fluidité de fusion, et elle est mesurée de manière standardisée par le test en spirale). La température de fusion de la police de caractères varie de 1135 °C à 1350 °C selon la teneur en carbone..

Dans un alliage fer – carbone, les constituants se classent en deux catégories :

- Matériaux à base de fer : ferrite, austénite
- Ceux qui sont riches en carbone : cémentite Fe_3C , graphite (variété cristallisée du Carbonepur).

Sauf cas exceptionnel, le graphite n'apparaît pas dans les aciers.En revanche, le graphite se trouve fréquemment dans une variété de tailles de particules qui peuvent être contrôlées par des procédés particuliers de travail des métaux avant la solidification, ce qui conduit à une catégorisation fondamentale. [33].

Dans le travail des métaux des fontes, c'est principalement l'activité du silicium qui, selon la vitesse de refroidissement pendant la période de solidification, produit la structure

recherchée, soit avec une prédominance de graphite - fontes grises, par exemple - soit avec une prédominance de carburateurs – fontes blanches. [33].

Classification de fonte

En fonction de la teneur en carbone, de la structure du matériau (telle que décrite dans le paragraphe précédent), et du traitement thermique global, plusieurs types de fontes sont obtenus. Les deux polices les plus courantes sont la police en niveaux de gris et la police GS..

- La Fonte grise
- La fonte à graphite sphéroïdal (fonte ductile)
- La Fonte GS
- Fonte ADI
- La Fonte blanche
- La Fonte malleable

- **La Fonte grise**

Une famille de sources où le carbone existe sous forme de graphite. Fonte graphite lamellaire : le graphite se présente sous la forme d'une lamelle. Matériau à faible dureté, excellente coulabilité et facilité d'utilisation.

Excellent coefficient de frottement : forte capacité d'absorption des vibrations.

La fonte grise a une résistance à la compression de trois à cinq fois plus élevée que sa résistance à la traction.

C'est une matière qui subit peu de retrait après le moulage au sable.

Elle est utilisée pour les blocs-moteur et les bâtis de machine de toutes les dimensions.

La corrosion en surface de la fonte crée une couche protectrice. Ainsi, même si c'est un matériau qui prend rapidement un aspect rouillé, la fonte grise résiste bien à la corrosion [34].

- **La fonte à graphite sphéroïdal (fonte ductile)**

Nées postérieurement à la Seconde Guerre Mondiale, les fontes à graphite sphéroïdal – fontes GS -,

La sphéricité du graphite, lui-même de résistance mécanique négligeable, régularise la répartition des contraintes dans la matrice et permet de mieux approcher les propriétés de l'acier correspondant. [35].

Fonte GL

C'est la plus courante des fontes grises. Le graphite s'y trouve sous forme de lamelles. C'est cette forme lamellaire du graphite (effet d'entaille) qui rend les fontes GL fragiles [11]. Par contre, le graphite améliore les caractéristiques de frottement de la fonte et donc favorise l'usinage.

Les principales qualités des fontes GL sont :

- Facilité d'usinage
- Très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud
- Très bonne absorption des vibrations
- Stabilité dimensionnelle (réalisation de machine-outil silencieuse et stable géométriquement)
- Excellente coulabilité
- Prix du métal peu élevé
- Les principaux défauts :
 - Relativement fragile comparé aux aciers et aux fontes GS
 - Les principales utilisations :
 - Toutes pièces mécaniques (différents grades de résistance)
 - Bâtis de machines-outils, bonne résistance aux vibrations
 - Tuyaux et canalisation (il est possible de couler des tubes de grande taille via le coulage par centrifugation).

- **Fonte ADI**

Pour créer la police de caractères ADI, vous devez d'abord créer une police ductile de haute qualité. Le matériau ductile doit également pouvoir fléchir (Mo, Ni, Cu, Mn). L'insertion des éléments en alliage doit se faire en conservant la qualité de coulée brute de la structure. Le tremblement de la pièce limite la portion de la pièce.[37].

II.3.2. Matériaux pour la fabrication des pales

La majorité des pals éoliens sont en matériaux composites alliant légèreté et résistance..

Les pales des grandes eoliennes sont en matériaux composites qui apportent résistance et légèreté. Les matériaux utilisés pour construire les éoliennes de bord de mer doivent également être résistants à la corrosion..

- Les matériaux composites utilisés pour la fabrication des pales sont des mélanges de fibre de verre, de fibre de carbone, de résines polyester ou de résines d'époxy [40].

II.3.2.1 Aluminium

Les grands pales éoliens sont en matériaux composites qui apportent résistance et légèreté. Les matériaux utilisés pour construire les éoliennes en bord de mer doivent également être résistants à la corrosion. [29].

II.3.3. Matériaux pour la fabrication des nacelles

L'enveloppe de la nacelle est typiquement réalisée en matériaux composites. Le procédé de fabrication de la nacelle et du nez du rotor est identique à celui d'une pale, mais sans la même précision et résistance. La nacelle est souvent composée de plusieurs pièces. Le châssis de la nacelle est constitué de pièces de bois récupérées à grande échelle. Une ossature de 2 MW est souvent constituée de deux ou trois modules pouvant peser jusqu'à 4,5 tonnes chacun. [43].

II.6. Conclusion

Nous avons défini les différents matériaux utilisés en installation éolienne dans ce chapitre puisque nous avons évoqué les matériaux composites pour la pale, ainsi que la nacelle et le mât, qui sont constitués des mêmes matériaux composites..

En conséquence, il a été déterminé que les matériaux composites métalliques, tels que l'aluminium, sont résistants à la corrosion et aux températures élevées, ce qui est au centre des recherches de cette mémoire..

CHAPITRE III :

CORROSION ET PROTECTION CONTRE LA CORROSION

III.1 Introduction

La corrosion métallique est le phénomène suivant lequel les métaux et alliages ont tendance, sous l'action d'agents atmosphériques ou de réactifs chimiques, à retourner à leur état originel d'oxydes, de sulfures, de carbonates etc, plus stables dans le milieu environnant [26]. Elle se développe de ce fait, suivant différents processus, chacun d'eux caractérisant un type de corrosion : corrosion chimique, corrosion bactérienne et corrosion électrochimique. La corrosion des métaux et alliages peut alors se manifester sous différents aspects : généralisée, localisée, intergranulaire, par fissuration etc. [26].

III.2 Formes de corrosion

Le comportement à la corrosion d'un matériau en service dépend d'une multitude de facteurs :

- composition chimique et microstructure du métal;
- Composition chimique de l'environnement ;
- Paramètres physiques (température, convection, irradiation, etc.) ;
- sollicitations mécaniques (contraintes, chocs, Frottements).

III.2.1 La corrosion uniforme

C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. On trouve cette attaque notamment sur les métaux exposés aux milieux acides [27].



Figure III.1 corrosion uniforme

III.2.2 La corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie [27].



Figure III.2 corrosion galvanique

III.2.3 La corrosion caverneuse

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. On observe une attaque sélective du métal dans les fentes et autres endroits peu accessibles à l'oxygène [27].



Figure III.3 corrosion caverneuse

III.2.4 La corrosion par piqûres

Elle est produite par certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre [27].



Figure III.4 corrosion par piqûres

III.2.5 La corrosion inter granulaire

C'est une attaque sélective aux joints de grains. Souvent, il s'agit de phases qui ont précipité lors d'un traitement thermique [27].

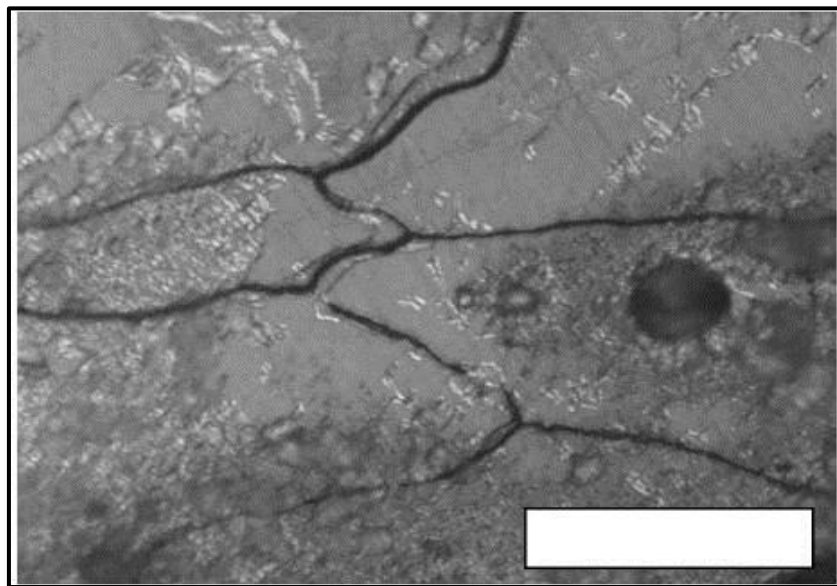
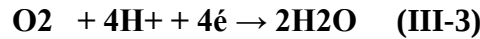
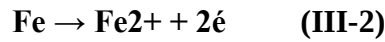
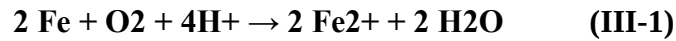


Figure III.5 corrosion inter granulaire

III.3 Réactions électrochimiques

Lorsqu'on plonge un métal (le fer par exemple) dans un acide contenant de l'oxygène dissous, il se produit une réaction entre le fer et les ions H^+ de la solution acide [28]. La réaction globale s'écrit alors :



La figure III.6 illustre le processus de dissolution du fer en milieu acide sulfurique, en présence d'oxygène dissous.

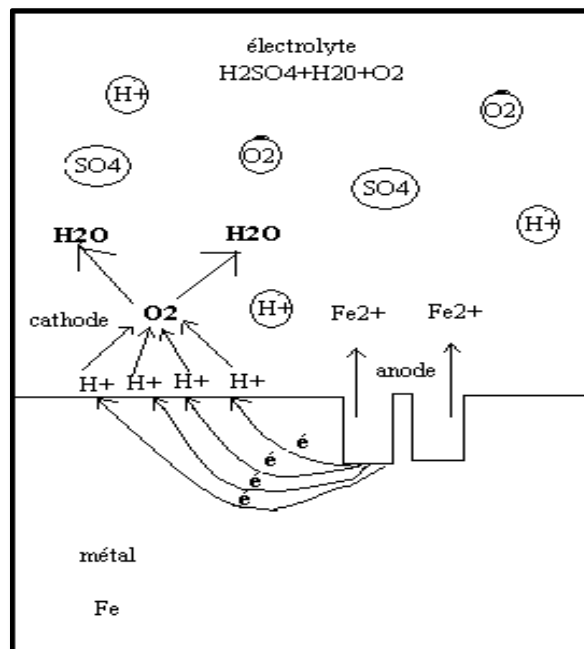


Figure III.6 Corrosion du fer dans l'acide sulfurique contenant de l'oxygène dissous [3].

III.4 Interfacemétal/solution

Lorsqu'un métal ε de valence n , est mis au contact d'un électrolyte, des ions Mn^+ passent dans la solution, on observe alors une séparation de charges. [29].

III.5 Processus faradique et non faradique

Un processus faradique est un processus qui fait intervenir un transfert d'électrons entre l'électrode et l'électrolyte, lequel provoque une oxydation ou une réduction ; l'électrode est appelée dans ce cas électrode à transfert de charge [29]. Par opposition, lorsqu'il ne se produit

aucun transfert d'électrons, à l'interface métal/solution, le processus est dit non faradique. En absence de processus faradique, on dira que l'électrode est idéalement polarisable.

Il est connu que la capacité d'un condensateur plan peut être calculée par l'équation :

$$C_H = \frac{dq}{d\Delta\Phi} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{L_H} \quad (\text{III-4})$$

Où ε représente le constant diélectrique de l'eau adsorbée, ε_0 la constante de permittivité et $q = q_M$ la densité de charge (C/m²). Le terme $\Delta\Phi$ représente la différence de potentiel entre le métal et la solution : $\Delta\Phi = \Phi_M - \Phi_S$. La variation de la capacité C_H en fonction du potentiel et de la concentration des ions de l'électrolyte support, ne peut être expliquée à l'aide de l'équation (I-4), par conséquent la théorie de Helmholtz n'est pas en mesure d'interpréter les lois régissant la structure d'une double couche expérimentale. Cependant, elle reste valable dans le cas des solutions concentrées.

La seconde théorie est celle de Gouy et Chapman, elle a été proposée afin de corriger les lacunes de la théorie de Helmholtz. Selon ces deux chercheurs, une disposition rigoureusement fixe des ions dans la double couche, simulant le condensateur plan, est impossible en réalité, car en plus des forces électrostatiques s'exerçant entre le métal et les ions, ces derniers subissent les forces d'agitation moléculaire thermique [30].

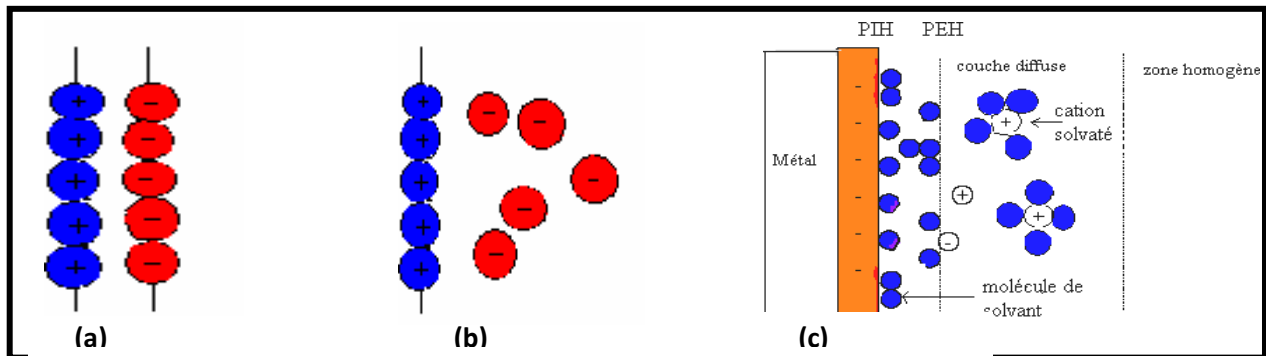


Figure III.7 Modèles de la double couche de l'interface métal-solution :

a) Helmholtz, b) Gouy-Chapman, c) Stern [4].

Le modèle de Stern est une combinaison des deux modèles de Helmholtz et de Gouy -Chapman.

$$\Delta\Phi = \Delta\Phi_H + \Delta\Phi_{GC} \quad (\text{III-5})$$

Par analogie avec un circuit électrique contenant deux condensateurs en série, la formule suivante donne la capacité totale de la double couche (figure III.7.c) :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{GC}} \quad (\text{III-6})$$

Avec C_H représentant la capacité de la couche compacte limitée par le plan externe de Helmholtz (PEH), et C_{GC} correspondant à la capacité de la couche diffuse [26].

III.6 Thermodynamique électrochimique

III.6.1 Diagramme potentiel-pH du fer

Une estimation du comportement probable de chaque métal dans des conditions voisines de l'état d'équilibre, peut être faite à l'aide des diagrammes potentiel-pH (diagramme de Pourbaix).

Deux oxydes solides, l'hématite Fe_2O_3 et la magnétite Fe_3O_4 , ont été pris en compte pour la construction du diagramme très simplifié de la figure III.8. Les différentes frontières représentées correspondent aux équilibres des espèces susceptibles de se former à l'interface fer-eau à 25°C.

Les oxydes superficiels formés lors de la dissolution métallique peuvent avoir un pouvoir protecteur sur le métal sous jacent [31]. Dans ce cas précis le métal est dit passivable, le film superficiel prenant le nom de film passif.

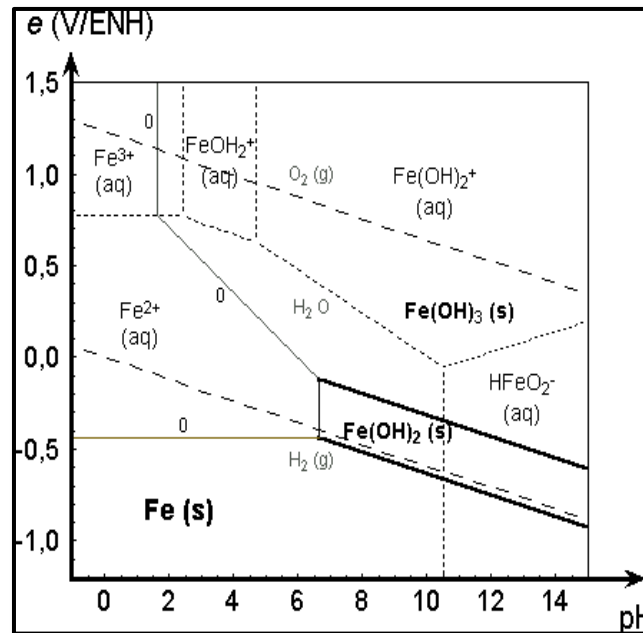


Figure III.8 Diagrammes potentiel-pH du fer dans H₂O (T = 25°C)

III.6.2 Cinétique électrochimique d'un système mixte

En cinétique électrochimique, la vitesse de réaction est associée à la densité de courant électrique « i », défini comme étant la quantité d'électricité transférée par unité de temps et par unité de surface :

$$= \frac{dq}{dt} = nFv \quad (\text{III-7})$$

Avec v = vitesse de réaction en mol.s⁻¹.cm⁻², n = nombre d'électrons échangés, F = Faraday = 96500 C et i = densité de courant global circulant entre l'anode et la cathode; il est la somme de deux densité de courant, l'une anodique « i_a », l'autre cathodique « i_c ».

$$i = i_a + i_c \quad (\text{III-8})$$

III.7 Causes de la polarisation

Lorsqu'une électrode est traversée par un courant extérieur, elle est le siège de phénomènes irréversibles. Le terme de polarisation est alors utilisé pour désigner l'ensemble de ces processus aux électrodes. Il s'en suit alors :

$$\eta = E - E_{\text{cor}} \quad (\text{III-9})$$

Les causes de la polarisation des électrodes sont diverses : polarisation de concentration (η_{conc}), polarisation d'activation (η_{act}) et polarisation de résistance (η_R) [42].

III.7.1 Polarisation de concentration

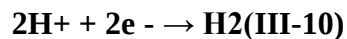
Cette polarisation apparaît, aux faibles concentrations, aux fortes polarisations et aux densités de courant élevées ; elle est en fait reliée aux phénomènes de transport de masse lors des processus électrochimiques.

III.7.2 Polarisation de résistance

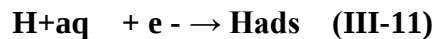
Les mesures de polarisation comprennent la chute ohmique, due à l'électrolyte entourant l'électrode, ou au film formé sur le métal ou les deux à la fois. [33].

III.7.3 Polarisation d'activation

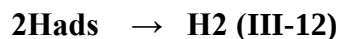
Les réactions électrochimiques ne se produisent pas instantanément : leur cinétique dépend en effet de certaines réactions intermédiaires qui peuvent faire passer une des espèces par un état activé (état d'énergie plus élevé) [33].



Nous examinons ci-dessous toutes les étapes qui permettent la réalisation de cette réaction. Afin de s'adsorber à la surface de la cathode, les ions H^+ doivent d'abord se combiner à un électron selon :



Cette réaction est relativement rapide, cependant pour que la réaction s'achève, il faut que deux atomes adsorbés (Hads) à la surface, soient suffisamment proches l'un de l'autre pour former une molécule d'hydrogène, soit :



III.8 Protection contre la corrosion

La lutte contre la corrosion est une préoccupation constante dans beaucoup de domaines industriels, elle doit être prise en considération depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation, il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet pour un minimum de charges.

III.8.1 Mesures préventives

Des mesures préventives prises au bon moment, permettant d'éviter de nombreux problèmes de corrosion et cela sans frais supplémentaires [34]:

- par un choix judicieux des matériaux;

- par une forme adaptée des pièces.

III.8.1.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux

Il sera possible de lutter contre les risques de corrosion en agissant sur le choix judicieux du matériau. Le choix des matériaux prend en compte les facteurs suivants :

- domaine d'utilisation;
- nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques;
- traitements sélectionnés;
- prix et disponibilité des matériaux.

III.8.1.2 Protection par une forme adaptée des pièces

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Nous aborderons quelques solutions types couramment employées pour limiter les risques en fonction du type de corrosion à redouter.

- **Corrosion en zone humide :**

La corrosion atmosphérique, forme de corrosion la plus fréquente, ne se produit qu'en présence d'humidité. La géométrie des composants employés devra donc viser dans ce cas à éviter les zones de rétention d'eau en prévoyant un bon drainage, soit en assurant, par leur géométrie, la vidange complète des récipients. De même, dans l'industrie chimique il faut assurer une vidange complète de récipients de toute sorte pendant les phases de non – utilisation. Des trous d'aération judicieusement placés évitent alors cette accumulation et diminuent ainsi le risque de corrosion [34].

- **Corrosion galvanique :**
- **Corrosion –érosion et corrosion – cavitation :**
- **Corrosion sous contrainte :**

III.8.2.1 Protection par revêtements

La structure à protéger est isolée de l'agressivité du milieu corrosif en utilisant des revêtements. Ils peuvent être métalliques ou non métalliques (voir le tableau I.1) [35].

Revêtements métalliques	Revêtements non métalliques	
	Organiques	Inorganiques

Chrome	Peintures	Couches de conversion
Aluminium	Vernis	
Plomb	Laques	Couches étrangères au substrat
Etain	Résine	
Cadmium	Graisses	
Cuivre	Cires	
Nickel		
Argent		

Tableau III.1 Types de revêtements.

III.8.2.1.1 Revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique, [35].

Selon leur comportement, il existe deux types de revêtements métalliques:

- **Revêtements nobles ou cathodiques**
- **Revêtements anodiques ou sacrificiels**

III.8.2.1.2 Revêtements non métalliques

- **Revêtements organiques**

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, ils se divisent en trois familles [36]:

- Les revêtements en bitume

On utilise ces revêtements pour protéger les structures enterrées en acier ou en fonte. Les revêtements polymériques

Il existe une grande variété de revêtements polymériques pour la protection des métaux contre le milieu agressif :

- Les thermoplastes (PVC, propylène, etc.) ;
- Les caoutchoucs (naturels ou synthétiques) ;
- les thermodurcissables (époxydes, polyesters, etc.).
- Les peintures et les vernis

Ils sont distingués par des couches très minces ($<100 \mu\text{m}$), leurs principaux constituants sont [43] :

- 1- Le liant qui assure la cohésion du film et son adhérence au substrat ;
- 2- Le solvant qui permet d'appliquer la peinture à l'état liquide ;

- 3- les pigments qui sont des composés qu'on ajoute aux peintures pour donner une couleur ;
- 4- les additifs et les charges ont différentes fonctions :
 - les additifs modifient certaines propriétés des peintures comme la viscosité, la Résistance à l'oxydation ou la tension de surface ;
 - les charges qui sont des substances bon marché, elles peuvent également améliorer certaines propriétés des films comme la résistance à l'abrasion.

Les métaux peints comportent en général plusieurs couches, ils peuvent avoir :

- Une couche d'accrochage fabriquée par phosphatation, c'est une couche de peinture primaire appliquée par électrophorèse (immersion de l'objet dans une émulsion de polymère en présence d'un champ électrique) ;
 - Une couche polymérique qui permet d'améliorer la résistance mécanique du revêtement ;
 - une ou deux couches de finition appliquées au pistolet, suivi d'un recuit au four.
- **Revêtements inorganiques**

On distingue deux types de revêtements inorganiques non métalliques [36] :

- Les couches de conversion

Elles sont distinguées selon leur procédé de fabrication, à savoir [36] :

- L'anodisation ;
- La phosphatation ;
- la chromisation.

- Les couches étrangères aux substrats

Ce type de couches inclut les revêtements inorganiques non métalliques suivants [36]:

- les émaux;
- le ciment;
- la céramique réfractaire.

III.8.2.2 Protection électrochimique

Elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. On distingue deux méthodes de protection [36]:

- la protection cathodique ;
- la protection anodique.

III.8.2.2.1 La protection cathodique

Elle consiste à abaisser le potentiel (métal – milieu) de manière à l'amener dans sa zone d'immunité ($E \leq E_{\text{prot}}$). Deux possibilités sont pratiquement utilisées :

- La protection par anode sacrificielle ;
- La protection par courant imposé

- **Protection par anode sacrificielle**

L'anode forme une pile électrochimique avec la structure à protéger qui joue alors un rôle de cathode, donc l'anode sacrificielle doit posséder un potentiel réversible inférieure à celui du métal que l'on veut préserver.

Protection par courant imposé

Cette méthode utilise un générateur extérieur et une anode auxiliaire. Elle offre l'avantage de pouvoir régler la f.e.m ou le courant en fonction des besoins, [36].

III.8.2.2.2 La protection anodique

Elle consiste à élever la tension (métal – milieu) de manière à l'amener dans sa zone de passivation. Elle s'applique aux métaux passivables, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif $E_{\text{corr}} < E_{\text{passiv}}$. Une polarisation anodique permet dans ce cas de déplacer le potentiel dans le domaine passif où la densité du courant passif est très faible. En revanche pour atteindre l'état passif, il faut appliquer une densité de courant nettement plus élevée, car elle doit être supérieure à la densité de courant de passivation.

La protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitriques ou phosphoriques), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane et le zirconium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés [37].

III.9 Conclusion

Enfin, nous avons abordé de manière très simple la théorie de corrosion. nous avons étudié Potentiomètres galvaniques et corrosion galvanique rapidement. et nous avons étudié Exigences pour les structures en acier à protéger contre corrosion; Et la théorie de base de la

protection est décrite, c'est-à-dire une étude Options de revêtement environnemental et protecteur, options Préparation de surface ainsi que données générale

CHAPITRE IV :

TRAVAIL EXPERIMENTAL

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats obtenus grâce à une expérience que nous avons menée concernant la corrosion au niveau du laboratoire de corrosion.

Nous divisons ce chapitre en deux parties, la première partie présente les méthodes expérimentales et la deuxième partie présente les résultats obtenus et leur discussion.

VI.2. Méthodes expérimentales

IV.2.1. Perte de Masse

Afin d'obtenir des résultats précis et une étude sérieuse, nous avons apporté un échantillon de l'acier utilisé dans le mât des éoliennes. L'échantillon a été divisé en trois parties égales.

Dans ce processus, nous avons travaillé sur trois échantillons d'acier à 12% de Mn de poids différents, dont le poids a été mesuré avec une balance (KERN) voir figure IV.1



Figure IV.1. Balance KERN utilisé

- **Nous avons :**

Le tableau IV.1. montre la masse en (g) des échantillons leur émergence dans la solution de HCL

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Masse (g)	5.4029	4.8064	5.1161

Tableau IV1 : Le tableau montre la masse (g) des échantillons avant d'être placés dans la solution

Nous avons préparé les trois échantillons en les nettoyant des sédiments et de la rouille, et cela se fait par un processus appelé : décapage et polissage.

A

(C : concentration en mole)	C1 =1	C2 = 0.5	près netto yage
(V : volume de l'échantillon.litre)	V1 = ?	V2 = 20	

, on place chaque échantillon dans un récipient contenant une solution d'HCl sa concentration 3 mol. Nous laissons chaque pièce pendant un certain temps dans la solution. Suivant le tableau IV.2.

Tableau IV.2: Un tableau indiquant le temps (min) pendant lequel chaque échantillon a été placé dans la solution

IV.2.2. Etude électrochimique

Dans la deuxième expérience, nous avons apporté deux morceaux de l'échantillon d'acier du mât à étudier, le morceau d'acier a été soudé avec le fil électrique et recouvert les côtés de matière plastique à l'exception de la surface et malaxé pour se concentrer davantage dessus, nous avons préparé une solution diluée suivant le tableau IV.5.

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Temps (min)	30	60	120

Tableau IV.3 : concentration (mol) et volume (litre)

$$C1.V1 = C2.V2 \quad (1)$$

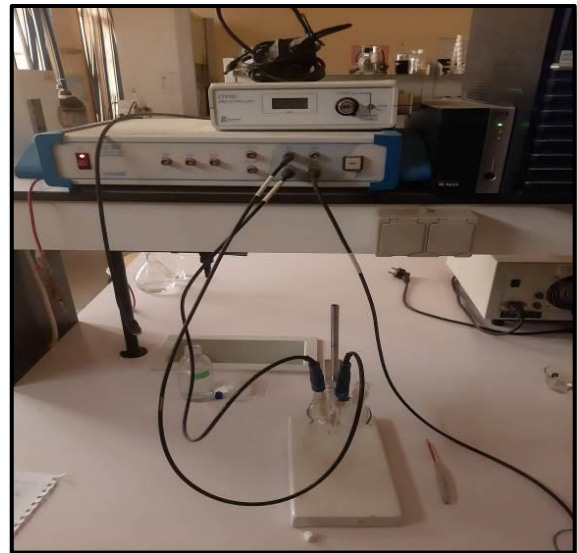
- 1M. $V1 = 0.5 \times 20$
- $V1 = 0.5 \times 20 / 1$

– $V_1 = 10 \text{ ml}$

A partir d'une solution de HCL avec une concentration de 1 m

Nous avons préparé une solution diluée 0.5 m à partir de relation (1)

Après avoir placé l'électrode et l'électrode de référence dans la cellule connectée à



l'appareil voltalap connecté à l'ordinateur(**figure2**)

Figure IV.2 : Voltalap

Nous préparons la cellule et les méthodes pour la solution formée à partir de la solution que nous avons préparée dans l'équation (1) voir figure 3 Nous préparons la cellule et les méthodes pour la solution formée à partir de la solution que nous avons préparée dans une équation avec de l'eau d'un volume de 10ml, de sorte que le volume devient 20 ml.



Figure IV.3: Cellule d'experience

Nous préparons l'électrode de travail et nous la connectons à la cellule (figure 4)

**Figure IV.4:** Électrode de travail

L'électrode de travail est en acier au Mn, Avant de le placer dans la solution, nous le préparons à travers le processus (décapage – polissage)

IV. 3. Résultats et discussion

IV.3.1. Perte de Masse

Avans de poser chaque échantillon dans la solutionHCL en fonction de temps on a obtenu les résultats suivant le tableau IV.1:

Echantillons	Temps (min)	Masse (g)
1	30	5.4029
2	60	4.8064
3	120	5.1161

Tableau IV.4 : Masse échantillons avant émergence en solution

Après avoir extrait chaque morceau de la solution, laissez-le sécher un peu de la solution, puis mesurez chaque morceau après l'avoir extrait de la solution résultante, comme indiqué dans tableau IV.2

Echantillons	Temps (min)	Masse (g)
1	30	5.4013
2	60	4.8072
3	120	5.1099

Tableau IV.5 : Masse de l'échantillon après émergence dans la solution

Après ce processus, nous calculons la vitesse de corrosion, et pour son calcul, nous devons mesurer la zone d'usure qui s'est produite dans les pièces en fer (figure 5).



Figure IV.5: Corrosion survenue sur l'échantillon après son extraction de la solution

Pour calculer la vitesse de corrosion, il faut appliquer la relation

$$V = \Delta m / S.t \quad (2)$$

Tout d'abord, nous mesurons l'étendue de la corrosion qui s'est produite dans la pièce à partir des cinq côtés de la pièce

Étant donné que les pièces sont coupées à la taille 1 cm

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Surface (l'offre × la taille) mm ²	$2.5 \times 10 = 25$	$2.5 \times 10 = 25$	$1 \times 10 = 10$
	$1 \times 10 = 10$	$2.5 \times 10 = 25$	$1.5 \times 10 = 15$
	$1 \times 10 = 10$	$1 \times 10 = 10$	$2.5 \times 10 = 25$
	$1.5 \times 10 = 10$	$1.5 \times 10 = 15$	$1 \times 10 = 10$
Superficie totale mm ²	160	170	160

Tableau IV.6 : Tableau montrant l'aire des cinq côtés de l'échantillon

Nous convertissons des g en mg on obtient :

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
$V = \Delta m / S.t$ (heure)	$5401.3 - 5402.9 / 160 \times 0.5 = -0.02$	$4807.2 - 4806.4 / 170 \times 1 = 0.004$	$5109.9 - 5116.1 / 155 \times 2 = -0.019$

Tableau IV.7 : Tableau montrant le taux de corrosion

Comme on a obtenu le graphique suivant à partir de l'appareil utilisé pour l'expérience au niveau du laboratoire de corrosion.

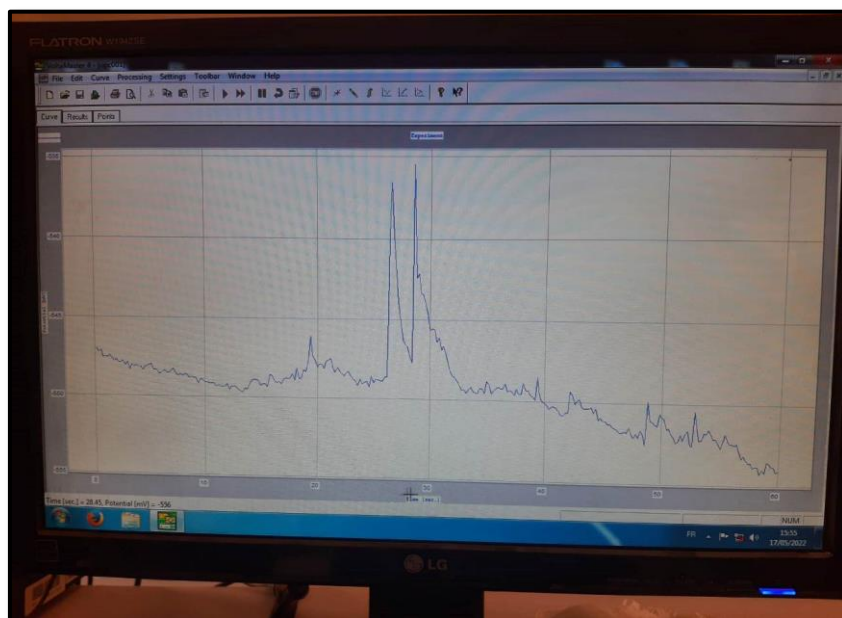


Figure IV.6: Obtenue après avoir placé l'électrode de travail dans la solution

- Effort d'équilibre = -566 mv
- Temps= 28.45 sec

Pour trouver le potentiel d'équilibre entre le métal et la solution Nous spécifions une plage de -870 à 200 dans le programme, et ce graphique apparaît la capacité et la Double couche sont mentionnés dans le graphe

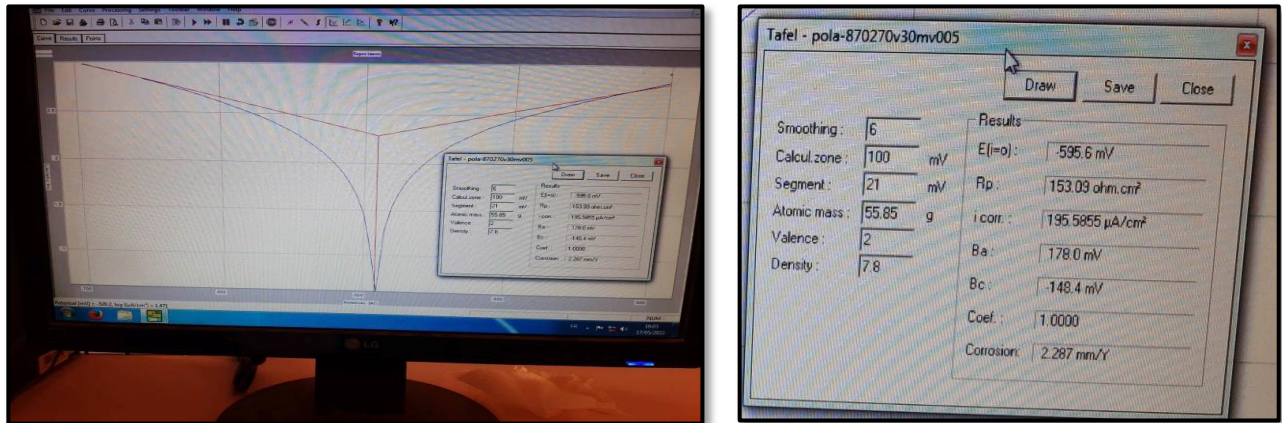


Figure IV.7: Graphe montrant la capacité et la double couche de corrosion

Après l'opération, on remarque un changement de couleur de l'électrode ce qui explique la corrosion du matériau utilisé. C'est-à-dire il n'a pas résister à la corrosion.



Figure IV.8 : Changement de Couleur Electrode de travail après l'opération

IV.4. Conclusion :

Dans ce chapitre expérimental, nous avons divisé l'expérience en deux parties.

1- La première partie, nous avons apporté 3 échantillons de fer solide avec différents blocs que nous avons mis en solution HCL avec un changement de temps, nous avons donc remarqué une diminution de la masse des échantillons tout ce qui a changé de temps et à

partir de là, nous en concluons qu'il est arrivé de corrosion et à partir de là, nous avons calculé la vitesse de corrosion.

2- Nous avons apporté un électrode de travail et l'avons mis avec le électrode de référence. Dans la cellule qui contient une solution à 20 ml concentrations associée à un dispositif voltalab

Nous avons eu des courbes qui nous montrent l'équilibre et double couche, capacité après la fin du processus, nous avons remarqué un changement de couleur de l'électrode de travail, à partir duquel nous concluons qu'il y avait une corrosion.

En fin nous recommandant une protection contre la corrosion pour cet acier pour qu'il être utilisé à la fabrication du mat d'une éolienne.

CONCLUSION

CONCLUSION

Le travail effectué dans ce mémoire est lié à l'évaluation des propriétés de l'acier utilisé dans le mât des éoliennes. Étudier les types de corrosion, qui est l'un des plus grands risques pour le mât de l'éolienne, en plus de connaître les propriétés de l'acier et des matériaux fabriqués, ce qui nous permet d'éviter et de réduire les problèmes de corrosion. Dans notre étude, nous avons calculé le taux de corrosion par des expériences en laboratoire sur trois échantillons d'acier afin de connaître la résistance du mât de l'éolienne.

Recommandations

Nous recommandant une protection contre la corrosion bien choisi, pour cet acier pour qu'il être utilisé à la fabrication du mat d'une éolienne.

Perspectives

A l'avenir, nous aimerions développer des études et faire de nombreuses expérimentations en laboratoire sur l'acier et les autres matériaux fabriqués dans le mât comme les fontes afin de créer une plus grande résistance à la corrosion.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] THOMAS ACKERMANN, Wind Power in Power systems, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005.
- [2] www.energies-renouvelables.o
- [3] Nicolas LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » thèse de doctorat de L'INPG Spécialité Génie Electrique Institut national polytechnique de décembre 2002
- [4] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly-coupled wind turbine applications » USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [5] L. Söderlund, JT. Erikson, J. Salonen, H. Vihriäläans R. Perälä, « A permanent-magnet generator for wind power applications », IEEE transaction on magnetics, vol 32, N° 4, july 1996.
- [6] Technique de l'ingénieur D 3 960.
- [7] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [8] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.
- [9] Loucif Mourad, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat de l'Université de A.B. Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2016
- [10] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for Wind turbines », Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, décembre 2001
- [11] Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [12] O. GERGAUD « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » thèse de doctorat de l'école Normale supérieure de CACHAN, 2002

- [13] L. KHTTACHE «Etude et commande d'un système Eolien à base d'une MachineElectrique Double Alimentée »Thèse de magister université de Batna ,2007.
- [14] SATINFO (Société du Groupe Sonelgaz), « Programme des énergies renouvelables et del'efficacité énergétique », Mars 2011
- [15] Syndicat des énergies renouvelables, www.enr.fr, dernière révision du document : juin.2012.
- [16] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art »,janvier 2006, pp. 1-129
- [17] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator fordirectly coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applicationsconference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394
- [18] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans unréseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies deLille (USTL)
- [19] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes deproduction électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.
- [20] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés etconvertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [21] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for windgeneration », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [22] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development andelectrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver,Colorado,USA, June 6 à12, 2004.
- [23] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3»,2002. 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paperN°20027, pp. 716-724
- [24] [ttp://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html](http://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html)

Reference

- [25] ernardMulton, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situationénergétique mondiale à l’aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressourcesrenouvelables », revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14
- [26] : J.Benard, A.Michel, J.Philibert et J.Talbot, Métallurgie Générale, Masson Editeurs,1969.
- [27]: D. Landolt, Traité des Matériaux, Corrosion et Chimie de Surfaces des Métaux,1ère Edition, CH-1015 Lausanne 1993.
- [28]:J.M.Dorlot, J.P.Bailon, J.Masounave, Des matériaux, 2ème Edition Revue de l'EcolePolytechnique de Montreal, 1986.
- [29]:A.J.Bard, L.R.Faulkner, Electrochimie : Principes, Méthodes et Applications,Masson,Paris, 1983.
- [30] : L.Antropov, Electrochimie Théorique, Edition MIR-MOSCOU, 1979.
- [31] : M.Pourbaix, Atlas d'Equilibres Electrochimiques, Ed. Gauthiers- Villars, Paris 1963.
- [32] : M.Pourbaix, Corrosion Science, 14 (1974) 25-82. PergamonPress.
- [33] : H.Uhlig, Corrosion et Protection, Dunod Paris, 1970.
- [34] : H. Uhlig, Corrosion et Protection, DUNOD, Paris (France 1970).
- [35]: J. Catonné, I. lacourcelle, les Revêtements Protecteurs dans l'Industrie, Principe - Applications – Choix, CAST LYON, 1977.
- [36]:A.Campa, Protection des Surfaces Métalliques Contre la Corrosion, TechnologieProfessionnelle pour les Mécaniciens, Tome 2, Paris, les Editions Foucher, 1971.
- [37] : C. Fiaud, Inhibiteurs de Corrosion, ε160, Technique de l'Ingénieur, 2000.
- [38] :Nace Glossary of Corrosion Terms, Mat.Prot, 4,(1965), 79 .

Résumé

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'étendue de la résistance à la corrosion de l'acier utilisé dans la fabrication des mâts d'éoliennes, qui recèle de grandes perspectives et espoirs dans le domaine des énergies renouvelables. Les matériaux composites du mât étaient connus et étudiés, et les types et mesures de corrosion des matériaux étaient étudiés. En plus d'une expérience sur l'ampleur de l'effet de la corrosion sur l'acier fabriqué pour le mât des éoliennes.

Mots clés : mât, corrosion, matériaux, éolienne.

abstract

In this study, we are interested in the extent of corrosion resistance of steel used in the manufacture of wind turbine mast, which has great prospects and hopes in the field of renewable energy. The composite materials for the mast were known and studied, and the types and measures of corrosion for materials were studied. In addition to an experiment on the extent of the effect of corrosion on the steel manufactured for the mast of wind turbines.

Keywords: mast, corrosion, materials, wind turbine.

ملخص:

نهتم في هذه الدراسة بمدى مقاومة تآكل الفولاذ المستخدم في صناعة صارية توربينات الرياح التي لها افاق وامال كبيرة في مجال الطاقة المتجددة. تم معرفة ودراسة المواد المركبة للصارى ودراسة انواع ومقاييس التآكل للمواد. اضافة الى تجربة حول مدى تأثير التآكل على الفولاذ المصنع لصارية توربينات الرياح.

الكلمات المفتاحية: الصاري ، التآكل ، المواد ، توربينات الرياح.