



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ECHAÏD HAMMA LAKHDAR, EL OUED



FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologies

Filière: Génie mécanique

Spécialité:Énergies renouvelables

Thème

**Influence des éléments d'alliage sur l'amélioration de
la résistance à la corrosion d'une fonte GS destinée à
la réalisation des pièces d'éolienne**

Devant le jury composé de :

Président : Pr. AOUN Yacine

Examineur : Dr. MANSOURI Khaled

Encadreur : Dr. BOULIFA MED ILIASSE

Co-Encadreur : Mr. CHAABIA Nacer

Présenté par:

• BEN ALI Nacreddine

• HARIZ BELGACEM Moussa

• TOUAHRIA Abderaouf

Année universitaire 2023/2024



Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,
leur tendresse, leur soutien tout mes études A mes chères
sœurs et frères pour leurs encouragements permanents,

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

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

Remerciements

Nous remercions ALLAH, le Tout-Puissant, de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce mémoire.

La présentation de ce modeste travail nous donne l'occasion d'exprimer notre profonde gratitude au Dr. Boulifa Med Iliasse, Maître de Conférences à l'Université d'El Oued, pour son soutien tout au long de la durée de l'expérimentation.

Nous remerciant ainsi Mr. CHAABIA Nacer et les ingénieurs d laboratoire de corrosion pour leur aide pendant la réalisation du travail expérimental.

Table des Matières

Table des Matières

Table de matières	I
Liste des tableaux.....	V
LISTE DE FIGURES	VI
Introduction:	02

Chapitre I Généralités sur les énergies renouvelables

I.1.Introduction :	04
I.2. Production de l'énergie électrique :	04
I.3.Les centrales thermiques :	05
I.4.Les centrales nucléaires :	06
I.5.Les centrales hydro-électriques :	07
I.6.Les centrales éoliennes :	08
I.7.Les centrales solaires ou photovoltaïques :	09
I.8.L'énergie renouvelable :	10
Conclusion :	11

Chapitre II : Étude de l'éolienne

II.1.Introduction:.....	13
II.2.Généralités sur les systèmes éolienne:	13
II.3.Définition de L'Energie Eolienne:.....	14
II.4.Descriptif une éolienne:	14
II.5.Principaux Composants d'une Eolienne:	15
II.6.Le Principe de Fonctionnement d'une Eolienne :	16
II.7.Les Différents types d'éolienne:	16
✦Éoliennes à axe vertical:.....	18

Table des Matières

Les Avantage/les Inconvénient:	18
Les inconvénients:	19
II.8. Regulation Mécanique de La vitesse d'une Eolienne:.....	20
II.9. Potentiel Eolien en Algérie:	20
II.10. Programme de l'énergie éolienne en Algérie:	21

Chapitre III : Corrosion et protection contre la corrosion

III.3. Types de corrosion électrochimiques:.....	25
III.4. Corrosion uniforme:	37
III.5. Corrosion localisée:	27
III.6. Corrosion par piqûre :.....	28
III.7. Corrosion sélective :	30
III.8. Corrosion intergranulaire:	31
III.9. Corrosion galvanique :	32
III.10. Fatigue-corrosion:	34
III.11. Corrosion sous contrainte:	35
III.12. Corrosion cavernueuse ou par crevasses:.....	36
III.13. Érosion-corrosion :	37
III.14. Approche cinétique de la corrosion:	39

Chapitre IV : Travail expérimental

VI.1. Introduction:	51
VI.2. Méthodes expérimentales:	51
VI.3. Solution de H ₂ SO ₄ :	52
VI.4. Solution :HCL	56
VI.5. Résultats et discussions:	56
VI.5.1. Une expérience eau de mer.....	58

Table des Matières

VI.6.Conclusion :	60
Conclusion :	63
Références bibliographies :	65

Liste des Tableaux et figures

Liste des tableaux

N	TITRE	PAGE
IV.1	Composition chimique des échantillons utilisés dans les essais	51
IV.2	Le tableau montre la masse (g) des échantillons avant d'être placés dans la solution H ₂ SO ₄	52
IV.3	perte de masse Après l'avoir mis dans l'acide H ₂ SO ₄	54
IV.4	Tableau montrant le taux de corrosion	56
IV.5	Tableau montrant la masse (g) des échantillons avant d'être placés dans la solution HCl	56
IV.6	perte de masse Après l'avoir mis dans l'acide HCl	56
IV.7	Tableau montrant le taux de corrosion	56
IV.8	Tableau montrant la masse (g) des échantillons avant d'être placés dans la solution eau de me	58
IV.9	perte de masse Après l'avoir placé dans l'eau de mer	59
IV.10	Tableau montrant le taux de corrosion	59

LISTE DE FIGURES

N	TITRE	Page
I.1	Les centrales thermiques à flamme	05
I.2	Centrale nucléaire	06
I.3	Centrale hydroélectrique	07
I.4	Photo d'une centrale éolienne	08
I.5	Photo d'une centrale solaire	09
I.6	La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale	10
II.1	Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur	14
II.2	Éléments d'une nacelle	15
II.3	Rotor d'une turbine	17
II.4	Tour d'une turbine	17
II.5	Éolienne de type Darrieus et Savonius	18
II.6	Configuration à axe horizontal	19
II.7	diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent	21
II.8	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie	22
III.1	Exemples de corrosion uniforme	27
III.2	Quelques exemples de corrosion par piqûres	28
III.3	Évolution d'une piqûre à partir d'une surface métallique avec un défaut dans la	29
III.4	Mécanisme de corrosion par piqûre d'aluminium	30
III.5	Exemples de corrosion sélective	30
III.6	Principe de la corrosion sélective	31
III.7	Photo de la corrosion intergranulaire	32
III.8	Photos de la corrosion galvanique	33
III.9	Mécanisme de corrosion galvanique	34
III.10	Photos de la fatigue-corrosion.	35
III.11	Photos de la corrosion sous contrainte.	37
III.12	Photos de la corrosion cavernueuse.	37
III.13	Mécanisme de corrosion cavernueuse de l'aluminium dans un milieu chlorure	37
III.14	Photos de la corrosion-érosion d'un tuyau	38
III.15	Attaque graduelle d'un métal recouvert d'une couche de produits de corrosion	38
III.16	Le principe des tourbillons entraînant la formation de creux d'érosion et de	39

LISTE DE FIGURES

III.17	Contrôle de la réaction électrochimique de corrosion par un processus de transfert de charge	40
III.18	Contrôle de la réaction électrochimique de corrosion par un processus de transfert de matière	41
III.19	Représentation schématique des courbes intensité-potentiel	42
III.20	Revêtement cathodique (cas du nickel sur fer)	45
III.21	Revêtement anodique (cas du zinc sur fer)	45
III.22	Blocage des sites (a) cathodiques et (b) anodiques	48

Introduction

Introduction :

L'énergie renouvelable désigne les sources naturelles qui ne s'épuisent pas et se renouvellent en permanence, telles que le vent, l'eau et le soleil, disponibles dans la plupart des pays du monde.

Elle peut également être produite à partir du mouvement des vagues et des marées, ainsi que de l'énergie géothermique et d'autres innovations. Elle diffère principalement des combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Les énergies renouvelables ne génèrent généralement pas de déchets de combustibles fossiles qui sont nocifs pour l'environnement, tels que ceux qui augmentent le réchauffement climatique, comme le dioxyde de carbone (CO₂). À l'exception de l'utilisation des biocarburants pour produire de l'énergie à partir de matières végétales, car bien que leurs déchets augmentent le réchauffement climatique, ils peuvent être durables. L'Union européenne et les Nations unies les considèrent comme une énergie renouvelable. De plus, les énergies renouvelables n'incluent pas l'utilisation de combustibles nucléaires, ce qui évite les résidus atomiques nocifs résultant des réacteurs nucléaires.

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 ce mémoire se compose de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons une vue générale sur l'énergie renouvelable et ses sources, ainsi qu'une explication des différentes centrales de production de l'énergie renouvelable et leurs conséquences. Dans le deuxième chapitre, nous étudierons d'une manière générale les éoliennes, leurs composants, leurs caractéristiques ainsi que le principe de base de leur fonctionnement. Dans ce même chapitre, nous analyserons en détail les composants de l'éolienne, en particulier le mât, qui fait l'objet de notre étude. Dans le troisième chapitre, nous aborderons l'usure et la corrosion à laquelle le mât est exposé en raison des facteurs climatiques, et comment s'en protéger. Dans le quatrième chapitre, nous discuterons de deux expériences sur la corrosion : la première consiste à utiliser une solution chimique, et la seconde à utiliser un courant électrique.

Chapitre I
Généralités sur les énergies
renouvelables

Chapitre I Généralités sur les énergies renouvelables

I.1.Introduction :

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre, de la biomasse humide ou sèche à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité. Ce n'est pas le cas des combustibles fossiles et nucléaires.

I.2. Production de l'énergie électrique :

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

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

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

Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont :

- Une turbine en mouvement.

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

I.3. Les centrales thermiques :

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel.

On la trouve souvent près d'une rivière ou d'un lac, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière figure (I.1). Thomas ackermann 2005

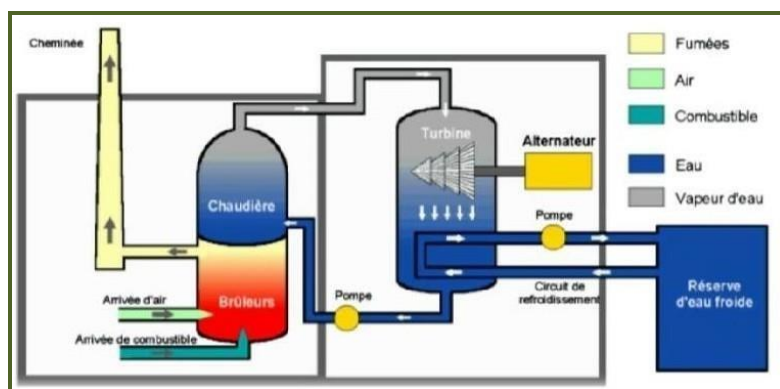


Figure I.1: Centrale thermique à flamme

Avantages :

- Cette énergie est rentable à la production.
- Elle a un prix modeste sur le marché mondial.
- Souplesse d'utilisation et disponibilité élevée
- Facilité d'exploitation
- Facilité de transport (pétrole)
- Possibilité de développer la cogénération
- Compétitivité

Inconvénients :

- Prix fluctuants
 - Géostratégie des ressources
 - Impacts sur l'environnement (Gaz à effet de serre, marée noire, etc.)
 - Il faut un plan d'eau à proximité.
- Les usines possédant un circuit de refroidissement à circuit ouvert, peuvent avoir des problèmes écologiques dus au réchauffement des rivières.

I.4. Les centrales nucléaires :

Ces centrales utilisent également des cycles de conversion thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire. L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Elles produisent environ 15% de l'électricité mondiale. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accident. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission figure (I.2). Nicolas Laverdure 2002

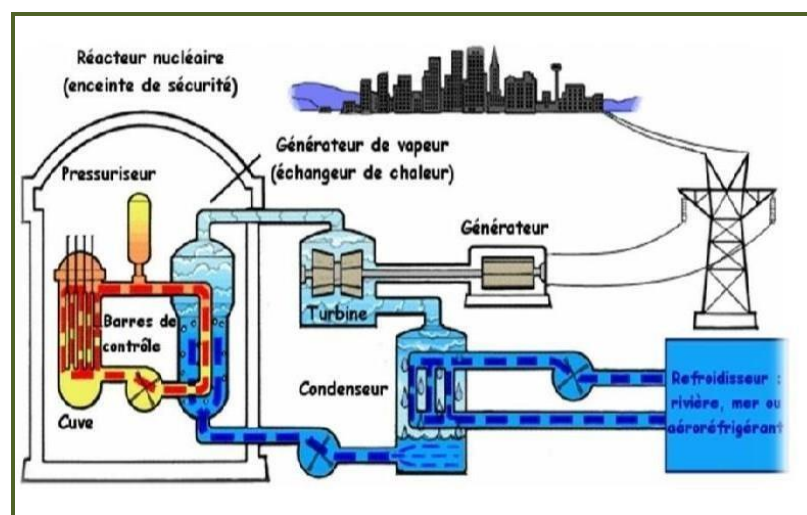


Figure I.2 : Centrale nucléaire.

Avantages :

- Adapté à la production de masse
- Disponibilité élevée
- Stabilité des coûts
- Réserves d'uranium importantes
- Faibles émissions de CO₂ en exploitation
- L'énergie nucléaire peut être utilisée dans le domaine spatial.
- Elle ne nécessite pas d'oxygène, ce qui est un atout pour l'homme

Inconvénients:

- Lourds investissements
- Risque industriel
- Nécessite un niveau de technologie élevé
- Acceptation du public
- Chaque année les tranches nucléaires produisent des tonnes de déchets.
- Le stockage des déchets qui augmente le niveau de pollution.
- Le risque d'accident (26 avril 1986 à l'usine de Tchernobyl).

I.5. Les centrales hydro-électriques :

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans le lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique figure. Chen, c.nayar 1998

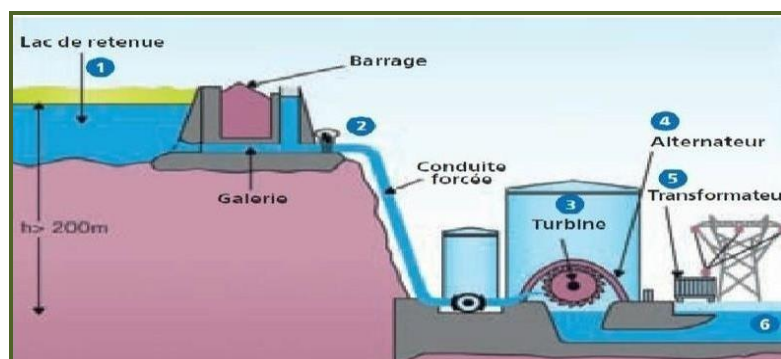


Figure I.3 : Centrale hydro électrique.

On distingue différents types de centrales hydroélectriques suivant la hauteur de chute:

- Les centrales de haute chute, ils utilisent des turbines de type Peloton.
- Les centrales de moyenne chute, ils utilisent des turbines de type Francis.
- Les centrales de basse chute, ils utilisent des turbines de type Kaplan.

Avantages :

Faible coût du KWh pour le gros hydraulique :

- Souplesse d'utilisation
- Possibilité de « stocker » de l'électricité pour le turbinage
- L'hydraulique est une énergie renouvelable mise en valeur mais pourtant rarement comptabilisée, elle fournit 13% de la production et contribue également à l'écrêtement des crues.

Inconvénients :

- Contrainte géographique
- Aléas climatiques (sécheresse)
- Nécessité de concilier les différents usages de l'eau
- Impacts sur l'environnement à la construction
- L'inondation de certains reliefs lors de la construction de barrages.

I.6. Les centrales éoliennes :

L'énergie éolienne est produite sous forme d'électricité par une éolienne. Des éoliennes formées d'un mat surmonté d'un générateur électrique entraîné par une hélice, sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées.

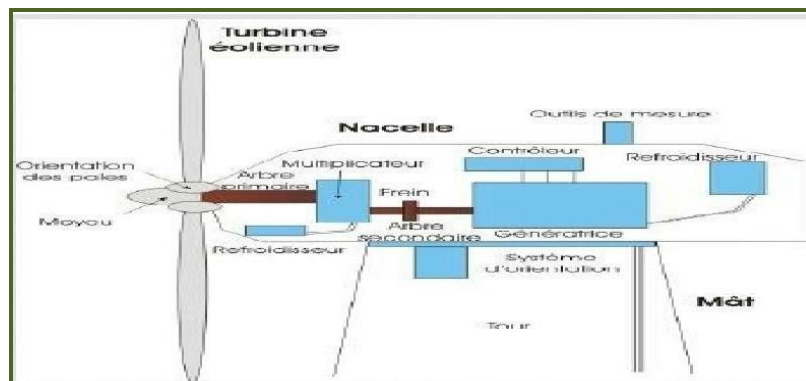


Figure I.4 : Photo d'une centrale éolienne.

Avantages :

- L'énergie éolienne est propre et peut être associée à des panneaux de photopiles et à une batterie d'accumulateur afin d'optimiser une fourniture d'électricité.

Inconvénients :

- L'exploitation de l'énergie éolienne est non polluante par elle-même mais les aérogénérateurs engendrent une pollution acoustique due à la notation des pâles qui engendrent une dégradation du paysage.

- Faible disponibilité (20 à 30%)
- Difficultés de raccordement au réseau
- Surface au sol
- Acceptation du public.

I.7. Les centrales solaires ou photovoltaïques :

Ces centrales produisent de l'électricité avec l'énergie solaire en utilisant les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux. S el aimani2012



Figure I.5 : Photo d'une centrale solaire.

Avantages :

- Acceptation du public
- Adapté aux pays chauds et aux sites isolés
- L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- Frais de maintenance relativement faibles.

Inconvénient :

- Coût encore élevé
- Puissance assez faible
- Disponibilité

I.8.L'énergie renouvelable :

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. O. Gergaud2002

Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité.

Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie.

Globalement, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. Selon le dernier " Inventaire sur la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde ", 20% du courant produit sur la planète est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon (62,7%) et par l'énergie nucléaire (17,1%) figure(I.6).

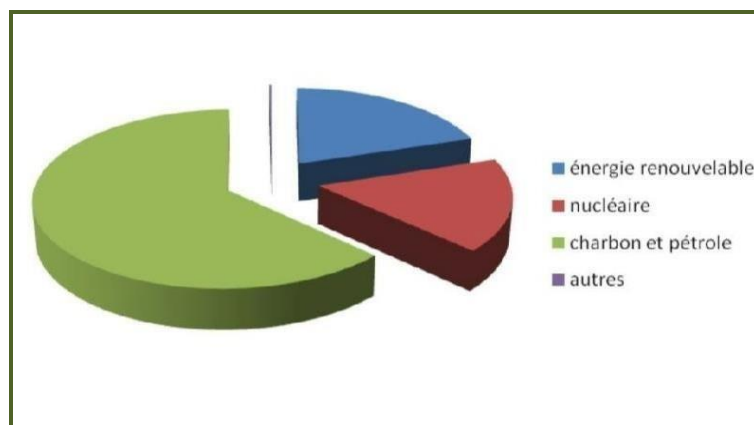


Figure I.6 : La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale.

Qu'un électron sur cinq soit " propre ", cela n'est déjà pas si mal. Mais ce chiffre encourageant masque une grande disparité entre les sources d'énergies renouvelables. À elle seule, l'hydroélectricité génère 92,5% de l'électricité issue des énergies électriques. Les utilisations de la biomasse produisent 5,5% du courant mondial " vert ", la géothermie 1,5%, l'éolien 0,5% et les techniques solaires y contribuent seulement pour 0,05%. A. Satinfo2011

Toutefois, ces grandes masses sont extrêmement variables d'un pays à l'autre.

Conclusion :

Ce chapitre s'est consacré à la présentation des énergies renouvelables avec une explication brève de leur notion de production d'électricité dans les différentes centrales.

Chapitre II

Etude d'éolienne

Chapitre II : Etude d'éolienne

II.1.Introduction:

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la génération de l'énergie électrique connaît un grand essor.

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].

II.2.Généralités sur les systèmes éolienne:

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 masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et la masse d'air est en perpétuel déplacement.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver etc.) 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 :** les éoliennes n'engendrent aucune pollution. Elle ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet.
- **L'énergie éolienne est prometteuse:** l'énergie éolienne est actuellement la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes.
- **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]

II.3. Définition de L'Énergie éolienne:

les éoliennes ayant fait de gros progrès depuis une dizaine d'années (plus 55% en productivité, moins 50% en niveau de bruit) [4]. R. Michaux 1997

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 rencontrés. 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].

II.4. 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]. J.w.smith,j.2004

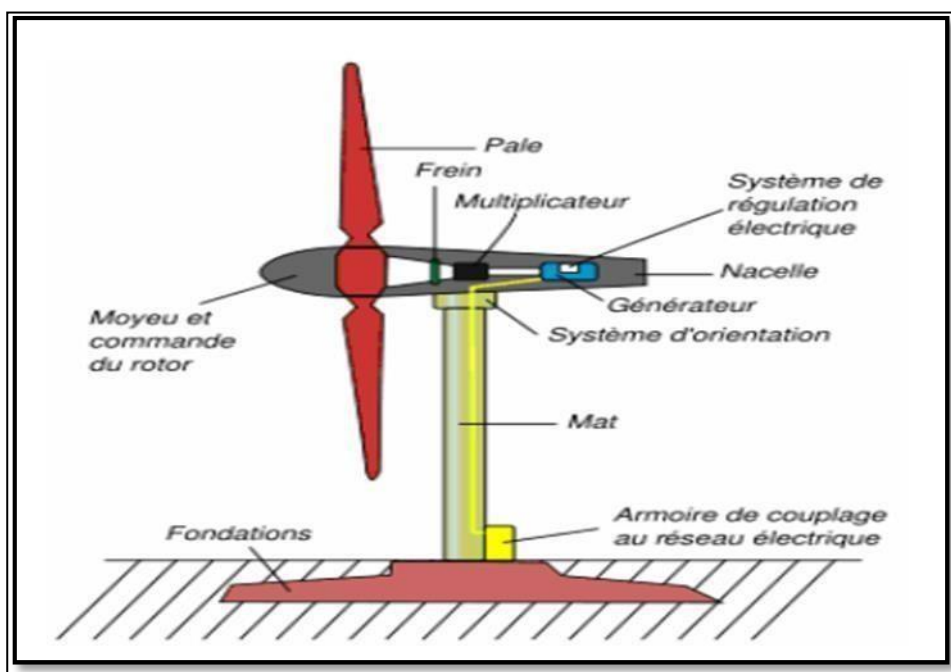


Figure II. 1: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol. S'agissant du mât. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins, Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10 m. La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé. Il faut que cela reste cohérent avec le prix global 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 est économiquement et techniquement beaucoup plus pertinente [8].

II.5.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)présenteunecouped'unenacelleavecsesdifférents composants:

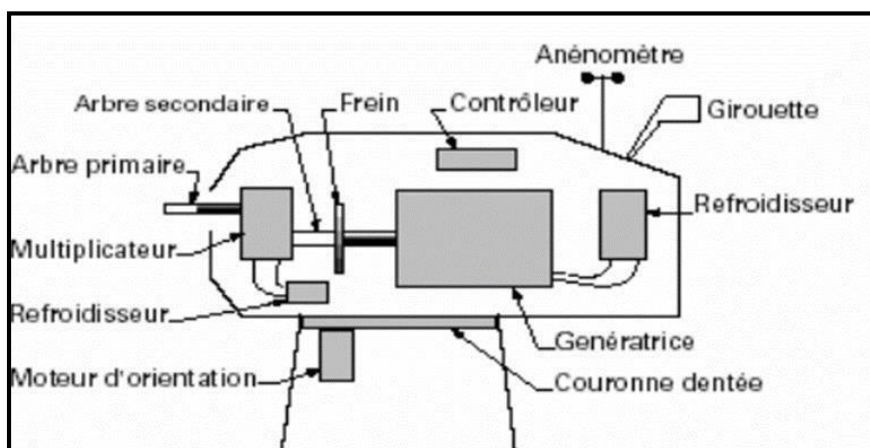


Figure I.2 Eléments d'une nacelle

- **Lerotor:**

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].



FigureI. 3:Rotor d'une turbine

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque. La surface A d'un disque circulaire est égale à :

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{1}{2} d\right)^2$$

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

- **Le mât:**

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne [10].



Figure II. 4: Tour d'une turbine

II.6. Le Principe de Fonctionnement d'une Eolienne:

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1 500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV.

La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être renouvelée transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV. Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent et tournent. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible.

II.7. Les Différents types d'éoliennes:

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

✦ Éoliennes à axe vertical:

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation. Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrius. L'éolienne Savonius comporte Principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages : Söderlund, jt 1996.

– 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 Darrius est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule.



Figure II. 5: éolienne de types Darrius et Savonius [4]

Les Avantages/les Inconvénients:

Les avantages:

- Elle est plus facile d'accès.
- 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 constitue un avantage de construction non négligeable.

- Lors du fonctionnement, elle n'est pas soumise aux contraintes importantes sur les pales aux changements d'orientations.
 - **Les inconvénients:**
 - Celui d'être moins productif. Elle produit moins que les éoliennes horizontales ; ce qui est pénalisant pour la rentabilisation 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 performantes que celles à axe

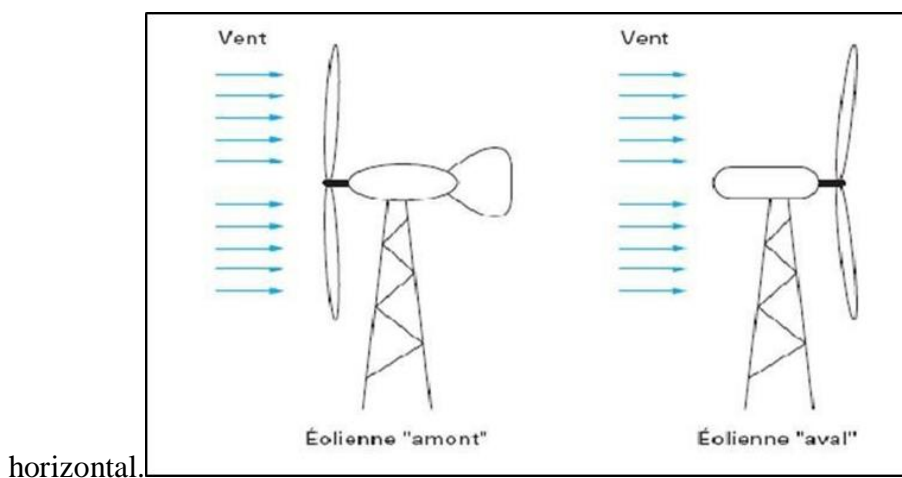


Figure II. 6 : Configuration à axe horizontal. [4]

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

Les avantages/les inconvénients:

- **Les avantages:**
 - Son rendement est élevé.
 - Elle est équipée d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent.
 - Elle est plus solide.
 - Ce type d'éolienne étant plus répandu, trouver un vendeur ou un installateur est plus aisé.
 - Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

Les inconvénients:

- Moins résistante aux vents forts que l'éolienne verticale.

- L'éolienne horizontale met plus de temps à se déclencher qu'une éolienne verticale. En effet, elle doit s'orienter par rapport à la direction du vent, ce qui retarde d'autant son déclenchement.
- 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.

II.8. Régulation Mécanique de la vitesse d'une éolienne :

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 vent 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] R. Swisher, C. Real de Azua 2001

D'après l'équation (I-10), on peut voir que la puissance produite est indéfiniment croissante en fonction de la vitesse du vent, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Les dispositifs de sécurité de la machine éolienne font en sorte d'avoir l'expression de la puissance répartie sur différentes gammes de vitesses du vent. Où :

V_d : Est la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne 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 sûreté 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] R. Michaux 1997

- **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

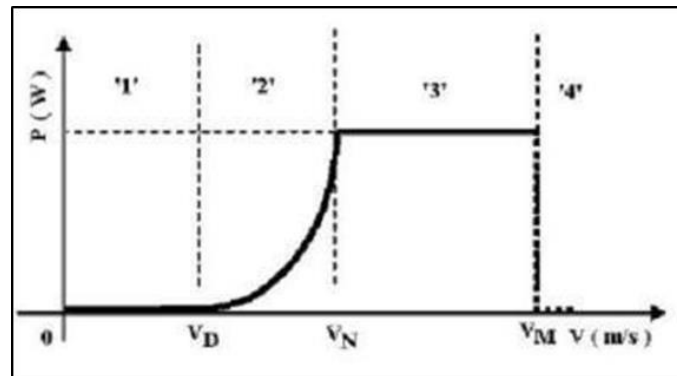


Figure II.7: Diagramme de la puissance sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent. La plupart II.9. Potentiel éolien en Algérie :

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4 m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6 m/s dans la région d'Adrar. figure (I.8) H. Ben ahmed, 2004

II.10. Programme de l'énergie éolienne en Algérie:

Le programme EnR algérien prévoit dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées. Cette période sera marquée par les actions suivantes :

- Construction d'une usine de fabrication de mâts et de rotors d'éoliennes.
- Création d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle.
- Montée en compétence de l'activité engineering et capacités de conception, procurement et réalisations capables d'atteindre un taux d'intégration d'au moins 50% par des entreprises algériennes. [14]

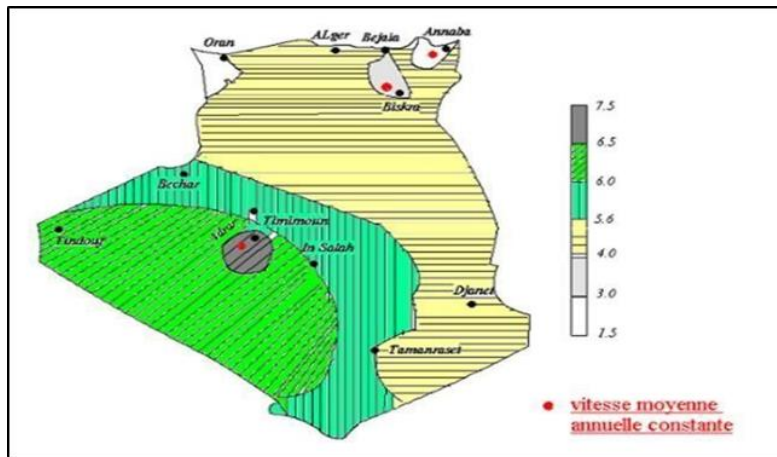


Figure II.8 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie [15].

Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

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, gratuite et inépuisable [19].

Loucif Mourad, 2016.

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 de 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].

Les inconvénients :

- Mêmes'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelquesdésavantages
 - L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [20]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. [18].
 - Les bruits mécaniquesouaérodynamiquesontété 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 éoliennespeuventnuire à la migration des oiseauxenétant un obstacle mortel. Eneffet, 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 systèmeséolienscoûtentgénéralement plus cher à l'achat que les systèmesutilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long En terme, ils constituent une source d'énergieéconomique et ilsdemandent peu d'entretien[24].
- Selonl'articlede[25],ilafalluplusieursdécenniespourréaliserdeséoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses. Loucif mourad2016

Conclusion:

- UtiliserlèventComme source d'énergie, cen'est pas nouveau. Suivantvotre situation, il est tout à fait envisageable d'utiliser l'énergie éolienne, du moins partiellement, pour produire votrepropreélectricité.Sil'énergieéolienneneserasansdoutepasàelleseulel'énergieverte de demain, il y a de fortes chances qu'elle soit un pas de plus vers une production d'énergie renouvelable et décarbonée.

Chapitre III
corrosion et protection
contre la corrosion

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 électro-chimique. 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.) ;
- Solicitations mécaniques (contraintes, chocs, frottements)

III.3.Types de corrosion électrochimiques:

- La corrosion électrochimique peut être
- Uniforme ou homogène.
- Localisée.
- Piqûres.
- Crevasse.
- Érosion-corrosion.
- Galvanique.
- Intergranulaire,
- Sous contrainte.

III.4. Corrosion uniforme:

– La corrosion uniforme ou généralisée est la conséquence de l'oxydation sous forme d'ions de tous les atomes qui composent la surface du matériau qui sont attaqués à une vitesse plus ou moins égale par le milieu corrosif. Cela se traduit, à l'échelle macroscopique, par une baisse régulière de l'épaisseur du métal, contrairement à la corrosion localisée.

– D'un point de vue pratique, le couplage d'une ou plusieurs réactions d'oxydation d'un métal ou d'un alliage à une ou plusieurs réactions de réduction d'une espèce en solution, conduit à la réalisation d'un potentiel de corrosion mixte, également appelé Potentiel libre ou potentiel d'abandon, localisé dans une zone du diagramme potentiel-pH où le métal est actif (diagramme de Pourbaix). La totalité de la surface métallique prend cette valeur de potentiel et constitue le site d'une corrosion généralisée décrite par la réaction (19):



M désigne le métal et M^{n+} l'ion correspondant ; Red désigne l'espèce réduite et OXZ^+ l'oxydant associé. H. Ben ahmed, 2004

Quand les sites de réaction sont très proches les uns des autres et se propagent aléatoirement sur la surface métallique et avec le temps, Il y a une corrosion généralisée (hypothèse de Wagner-Traud), qui donne lieu à une dissolution uniforme du matériau.

La réaction à laquelle correspond la dissolution du métal:



Le cation dissous peut alors se présenter sous plusieurs formes (hydraté, hydrolysé, etc.) ou former des liaisons plus complexes. La réaction cathodique varie suivant la nature des espèces oxydantes présentes en solution.

La corrosion généralisée est une forme de corrosion dans laquelle la perte de métal est à peu près uniformément répartie sur l'ensemble de la surface exposée au milieu (figure III.1). Elle peut se produire sur une surface 'nue' et est appelée une surface active ou un métal actif, ainsi la dégradation peut être rapide. Elle a souvent lieu sur une surface protégée par une couche superficielle d'oxydes (film passif). La vitesse de dégradation du matériau est alors faible, voire négligeable, mais pas nulle. H. Ben ahmed, 2004

Par corrosion généralisée, on entend une réduction uniforme de l'épaisseur. La vitesse de corrosion indique s'il est possible ou non d'utiliser le matériau. Par exemple : la vitesse de corrosion d'un alliage est :

- Excellent jusqu'à 0,05 mm/an
- Bon jusqu'à 0,5 mm/an.
- Satisfaisant jusqu'à 1,25 mm/an.

Mauvais au-delà de 1,25 mm/an



Figure III 1: Exemples de corrosion uniforme.

III.5. Corrosion localisée:

C'est une corrosion qui se déroule dans un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme, car les endroits anodiques et cathodiques sont clairement distincts. Dans la pratique, la corrosion localisée résulte d'une hétérogénéité entre le matériau et l'environnement. La corrosion localisée survient sur une portion du métal à une vitesse qui dépasse de loin la vitesse du reste de la surface. Gael robin 2004

Il peut avoir de nombreuses formes, les deux formes les plus fréquentes de corrosion sont la corrosion par piqûres et la corrosion intergranulaire.

La corrosion localisée survient parfois dans des situations de corrosion active, mais en général, c'est plutôt une maladie des matériaux passifs due à la dégradation locale de la passivité. La corrosion localisée comprend de nombreuses classes.

Les principales causes de ce phénomène de corrosion sont:

- ✓ Surface de métal chimiquement hétérogène..
- ✓ Différence de potentiel entre les différentes parties du métal créées par déformation.
- ✓ Endommagement local de la couche passive.

Les différents types de corrosion localiséesont :

- ❖ Corrosion par piqûres.
- ❖ Corrosion intergranulaire (intercristalline).
- ❖ Corrosion sous contrainte.
- ❖ Corrosion avec érosion.
- ❖ Fragilisation par l'hydrogène.
- ❖ Corrosion sélective.
- ❖ Corrosion galvanique.
- ❖ Corrosion par crevasses.

III.6. Corrosion par piqûre :

La corrosion par piqûre est une forme de corrosion localisée qui se traduit par des trous ou des creux sur la surface du métal (figure III.2). L'attaque se limite à des piqûres très localisés qui peuvent évoluer très vite en profondeur. Cette attaque constitue l'une des formes de corrosion les plus sévères. De plus, il peut être difficile de détecter la corrosion par piqûres parce que ces petits trous peuvent être masqués par des dépôts de corrosion. J. philibert 1969

Les solutions les plus agressives contiennent des chlorures, bromures, hypochlorites, sulfures et du H_2S .



Figure III.2: Quelques exemples de corrosion par piqûres.

L'attaque de l'acier inoxydable par les chlorures constitue la forme la plus célèbre de corrosion par piqûres. La surface de l'acier inoxydable est une couche d'oxyde qui assure la protection de l'acier. Lorsqu'une petite rayure se produit sur la surface, il peut s'agir d'une source de gradient potentielle entre la couche d'oxyde (cathode) et la rayure (anode), causant une piqûre.

Le processus d'initiation de la piqûre peut être divisé en plusieurs étapes : la période d'induction, l'initiation des piqûres et les processus de propagation. Les piqûres peuvent pénétrer plusieurs millimètres pendant un court laps de temps si les conditions sont extrêmement défavorables, comme le montre la figure ci-dessous (figure **III.3**).

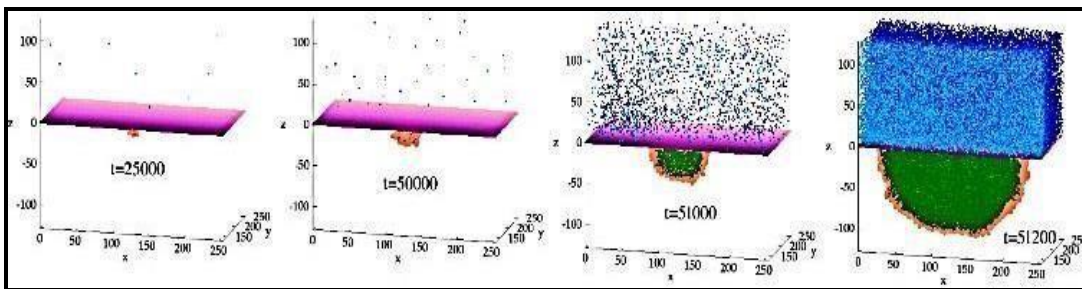


Figure III.3: Évolution d'une piqûre à partir d'une surface métallique avec un défaut dans la couche passive

Il est possible de décrire ce processus en quatre étapes distinctes et consécutives:

- ✓ Processus intervenant sur le film passif, dans la limite du film passif et de la solution.
- ✓ Processus se produisant dans un film passif, lorsqu'il n'y a pas de changement microscopique visible dans un film.
- ✓ Formation de piqûres dites métastables qui débutent et se développent pendant un court laps de temps en dessous du potentiel de piqûre critique et de retour (il s'agit d'une étape intermédiaire dans les piqûres).
- ✓ Croissance régulière, supérieure à un potentiel appelé potentiel de piqûre critique.

La figure suivante (figure **III.4**) présente les mécanismes de corrosion par piqûres dans les alliages d'aluminium.

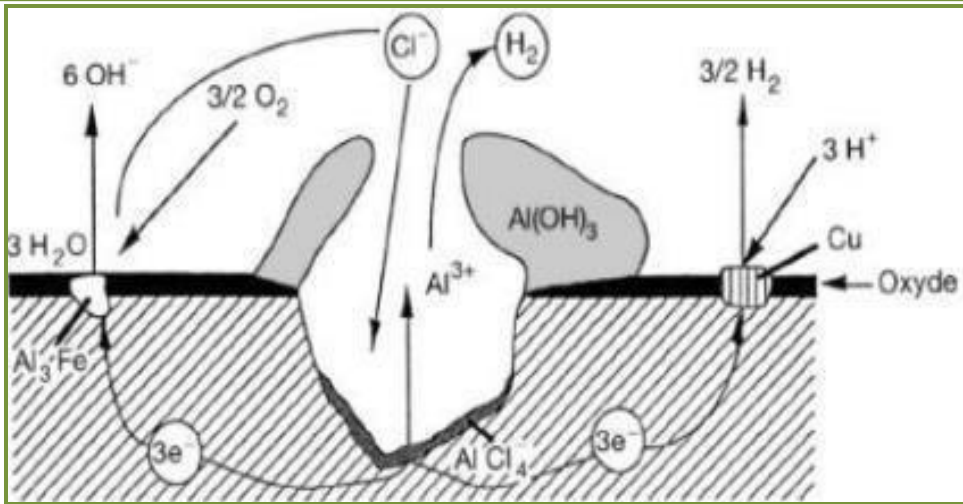


Figure III.4: Mécanisme de corrosion par piqûre d'aluminium.

III.7. Corrosions sélective :

Il s'agit de l'oxydation d'un élément de l'alliage entraînant la formation d'une structure métallique poreuse (figure III.5). Les différents cas de corrosion sélective sont classés en fonction de la nature des alliages concernés, les deux plus fréquents sont :

- Délignification du laiton : corrosion sélective du zinc (ou corrosion de l'alliage et redépôt du cuivre, le laiton prend la teinte rouge du cuivre).
- Graphitisation des fontes : corrosion du fer, graphite non attaqué, avec des fontes graphite lamellaires, l'attaque progresse en profondeur sans dégradation visible à l'œil nu.



Figure III.5: Exemples de corrosion sélective.

La figure III.6. Montre le mécanisme de la corrosion sélective.

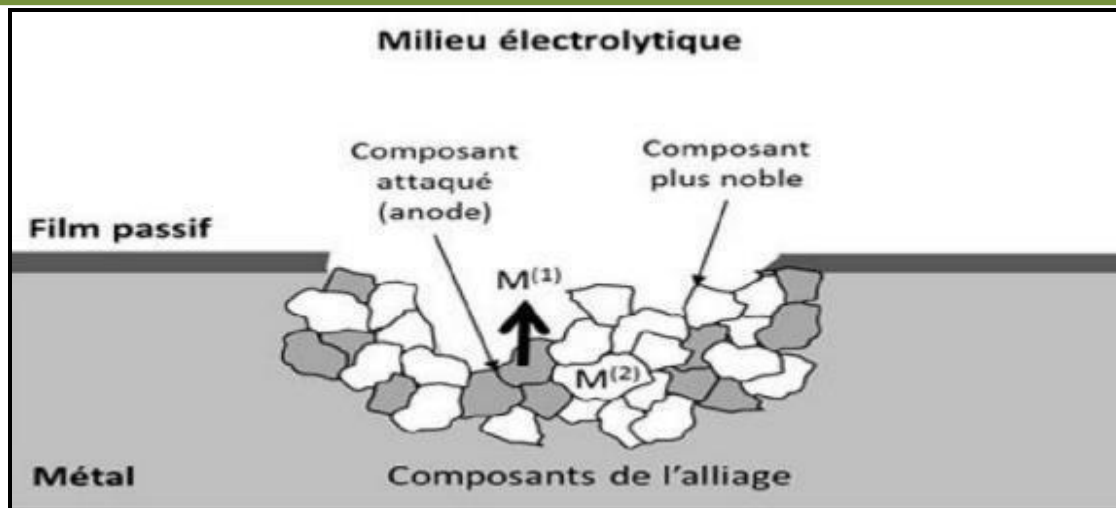


Figure III.6 :Principe de la corrosion sélective.

III.8. Corrosion intergranulaire:

La corrosion intergranulaire est une attaque localisée, par contre plus sélective, en raison de la précipitation de carbures dans les joints de grain pendant le chauffage entre 700 et 900°C, due à un traitement thermique du métal (par exemple par soudage).

Elle est invisible à l'œil nu, cependant, affecte de manière significative la résistance mécanique du métal. Plus la teneur en carbone est importante, plus la teneur en chrome est basse, plus la sensibilité à ce type de corrosion est grande. À titre d'exemple, on retrouve cette forme de corrosion dans les aciers inoxydables, la structure ferritique étant plus sensible à la corrosion intergranulaire que la structure austénitique. La théorie admise est l'appauvrissement en chrome dans les zones intergranulaires. Les aciers ferritiques ont des propriétés mécaniques moins intéressantes, en particulier une faible ductilité. Ils présentent aussi une moindre résistance à la corrosion que toutes les autres nuances. J. philibert 1969

D'autres alliages comme l'aluminium à haute résistance et certains alliages à base de cuivre sont également reconnus pour présenter une tendance à la corrosion intergranulaire.

Si les métaux ont l'air homogènes à l'œil nu, beaucoup d'alliages comme les aciers inoxydables sont en réalité composés de grains de compositions spécifiques interconnectés par des sections de métaux de différentes compositions (joints de grains) (figure III.7). Les effets des joints de grains sont en grande partie insignifiants. Toutefois, comme ils ont une structure de base différente du grain, ils peuvent parfois réagir davantage à la corrosion que le grain. Ceci peut conduire au développement d'une corrosion galvanique nommée laquelle l'alliage se désintègre.

En fait, une corrosion intergranulaire a également été observée autour de soudures en acier inoxydable faiblement recuites. corrosion Intergranulaire par



Figure III.7: Photo de la corrosion intergranulaire.

III.9. Corrosion galvanique :

Ce type de corrosion se produit lors du contact de deux pièces métalliques différentes : tuyauterie de fer et raccords de cuivre, soudures, hélice de bateau en bronze (Cu+ Sn (3 à 20 %)) et coque en acier, ...etc.

Quand deux pièces métalliques de nature différente sont mises en contact, la vitesse de corrosion du métal le moins noble est largement augmentée et celle du métal le moins noble est fortement réduite (figure III.8). La corrosion galvanique peut être définie simplement par l'effet de deux métaux ou alliages différents en contact avec un milieu corrosif conducteur. Nous utilisons également le mot bimétallisme. C'est l'attaque préférentielle de la phase la moins noble

des alliages biphasés où la corrosion peut exister entre deux matériaux métalliques ou plus dans le même environnement. Il y a formation d'une pile, la partie la moins noble est l'anode tandis que la partie la plus noble est la cathode. Le rapport surface Anode/cathode joue un rôle très important en raison de la corrosion galvanique maximale à la jonction des deux métaux. Il convient de garder à l'esprit que

plus l'anode est petite, plus la vitesse de dissolution est grande. J. Philibert,



1969

Figure III.8 : Photos de la corrosion galvanique.

Les métaux ou les matériaux qui peuvent être utilisés dans les couplages galvaniques sont énumérés dans les tableaux galvaniques, selon leur potentiel de corrosion dans un environnement sélectionné. De telles mesures doivent prendre en considération les paramètres cinétiques de la corrosion.

Le matériau de potentiel le plus bas d'un couplage galvanique est l'anode, l'autre, la cathode. Ces séries de potentiels permettent de déterminer le matériau qui sera le plus actif dans un couple galvanique et dans un milieu donné. Ces tables doivent donc être élaborées pour chaque milieu corrosif envisagé et dans des conditions se rapprochant le plus possible des conditions réelles d'emploi des matériaux.

Le tableau suivant présente la classification galvanique dans l'eau de mer de certains métaux et alliages :

Tableau2:Série galvanique, obtenue dans l'eau de mer à 25 °C.

Matériau protégé (cathodique ou plus noble)

Platine
 Or
 Graphite
 Hastelloy C
 Acier inoxydable
 Titane
 Argent
 Inconel base 600
 Nickel
 Alliages de cuivre
 Etain
 Bronze
 Laiton
 Cuivre
 Plomb
 Fer
 Acier bas carbone
 Alliages d'aluminium, série 2000
 Cadmium
 Aluminium, série 1000
 Alliages d'aluminium, séries 5000, 3000, 6000
 Acier galvanisé
 Zinc
 Magnésium et alliages de magnésium

ECORR ↑

Matériau corrodé (anodique ou moins noble)

Mécanisme de corrosion: Cas de l'acier et du cuivre au contact électrique à l'eau électrolytique

Le cuivre, plus électropositif (plus noble) que l'acier, envoie des électrons. L'acier rouille et protège le cuivre (figure III.9)

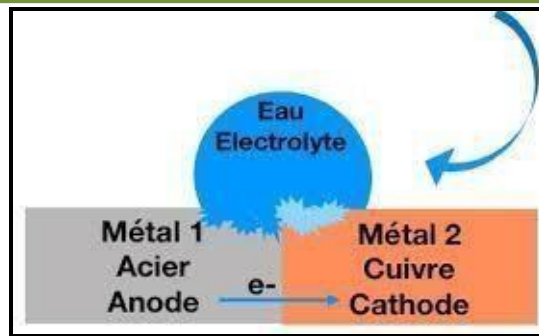


Figure III.9: Mécanisme de corrosion galvanique

III.10. Fatigue-corrosion:

La fatigue-corrosion peut être définie comme l'action combinée d'un environnement agressif et d'une contrainte cyclique entraînant une rupture prématurée du métal par fissuration (figure III.10).

Le mécanisme de rupture par fatigue comporte habituellement trois étapes:

- L'amorçage d'une fissure de fatigue à partir d'un défaut géométrique ou métallurgique entraînant une concentration locale de déformation ou de contrainte
- La propagation de cette fissure dans la pièce;
- La rupture de celle-ci.



Figure III.10: Photos de la fatigue-corrosion

III.11. Corrosion sous contrainte:

La corrosion sous contrainte (CSC) désigne la fissuration prématurée d'un matériau soumis à l'action conjointe d'un environnement chimique et à des contraintes mécaniques constantes ou lentement variables. Lorsque les contraintes sont cycliques, intergranulaires ou transgranulaires dont la direction générale de propagation perpendiculairement à la contrainte la plus élevée (figure III.11). Si l'intégrité de la structure résulte du contrôle de l'initiation de la fissure, la connaissance des grandeurs liées à leur propagation est également essentielle. elles sont désignées sous le nom de fatigue par corrosion (FC). Cet endommagement concerne plusieurs types de

matériaux (métaux et alliages mais aussi le verre, la céramique, les composites, etc.) dans des milieux variés (solution aqueuse, gaz, métaux liquides, solides, etc.). Ce type de corrosion, particulièrement insidieuse et dangereuse pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures

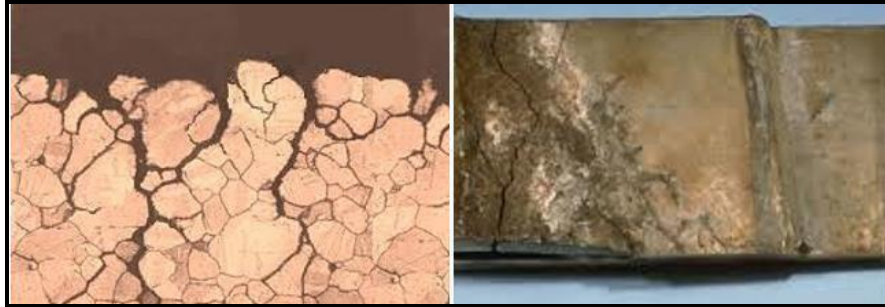


Figure III.11:Photos de la corrosion sous contrainte

III.12. Corrosion cavernueuse ou par crevasses:

La corrosion des crevasses, également appelée corrosion cavernueuse, est causée par une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure métallique. Il s'agit ensuite d'une attaque sur les pièces métalliques moins accessibles à l'oxygène (figure III.12). JChen, C. Nayar, 1998

La corrosion cavernueuse a lieu dans les crevasses. Avec Les robinets, la corrosion cavernueuse commence généralement entre les écrous et les rondelles. L'oxygène peut difficilement se diffuser dans ces fissures. Elle résulte de la différenced'accès de l'oxygène aux différentes parties du métal. L'oxygène dissous se renouvelle plus facilement à la surface et se disperse plus rapidement dans le métal. Il en résulte Un gradient de concentration d'O₂ dissous entre les zones oxygénées et non oxygénées, créant une pile de concentration. La zone de la pièce proche de la surface, donc plus oxygénée, devient une zone cathodique avec réduction de O₂ et libération de OH⁻. Cette zone est à l'abri de la corrosion. D'autre part, la partie de la pièce moins oxygénée fonctionne à l'anode avec dissolution de fer. Une zone d'hydroxydes ferreux et ferriques sépare les zones anodiques et cathodiques et contribue à aggraver l'hétérogénéité du milieu en O₂ dissous et en pH. S el aimani 1996

Les piles de concentration se produisent lorsqu'une pièce métallique homogène est immergée dans une solution dont la concentration en dioxygènes dissous n'est pas

uniforme. C'est le cas, par exemple, avec les piliers en métal dans un ponton. Mais cela peut aussi être dû à une différence d'accessibilité au dioxygène entre deux parties d'une structure (tôles pliées, raccords, joints, rayures sur une peinture de voiture).

Cette corrosion est causée par la formation d'une petite masse d'eau stagnante dans un vide d'oxygène et par la concentration d'anions corrosifs comme les chlorures. La corrosion caverneuse survient aux soudures qui ne sont pas parfaitement pénétrantes, aux joints de recouvrement ou autres joints mécaniques sous lesquels l'eau peut stagner.



Figure III.12: Photo de la corrosion caverneuse

Pour les alliages d'aluminium, la corrosion caverneuse est essentiellement une forme spéciale de corrosion par piqûres. L'acidification du milieu corrosif emprisonné dans une cavité empêchée, dans ce cas, la répartition homogène des piqûres, c'est pourquoi la corrosion est plus uniforme la pénétration de la corrosion est concentrée en un seul point (figure III.13). En fait, les alliages dépourvus de cuivre résistent relativement bien à cette forme de corrosion.

Ici encore, l'anodisation préalable des pièces assure souvent une résistance à la corrosion satisfaisante (vis, boulons, etc.). D'autre part,

l'anodisation permet d'obtenir une couche de surface dure, de nature diélectrique, ou une couche colorée à vocation esthétique.

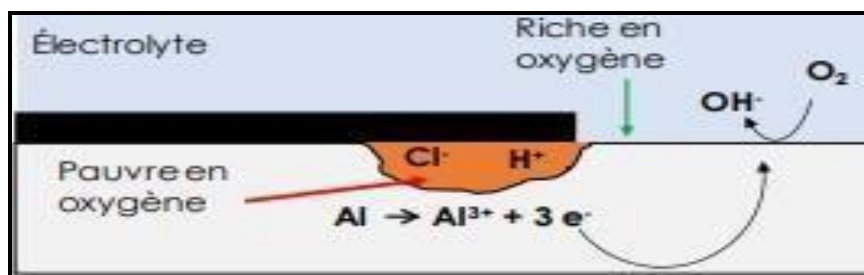


Figure III.13: Mécanisme de corrosion caverneuse de l'aluminium dans un milieu chlorure.

III.13.Érosion-corrosion:

La corrosion-érosion a été définie comme la dégradation accélérée d'un matériau en raison de l'action conjuguée de l'érosion physique et de la corrosion chimique. Elle entraîne l'élimination des produits de corrosion résultant de l'action érosive du fluide ou de la matière en suspension de ce fluide. Il intervient fréquemment sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide (figure III.14). J.chen,c.nayar1998



Figure III.14 : photo de la corrosion-érosion d'un tuyau

La corrosion dans une canalisation est due à la vitesse élevée du fluide:

- ✓ Par impact de particules solides.
- ✓ Par impact de gouttelettes liquides dans la vapeur (séchage de la vapeur en aval des turbines).
- ✓ Par une vitesse excessive du fluide.

La figure ci-dessous illustre le mécanisme de corrosion-érosion du métal.

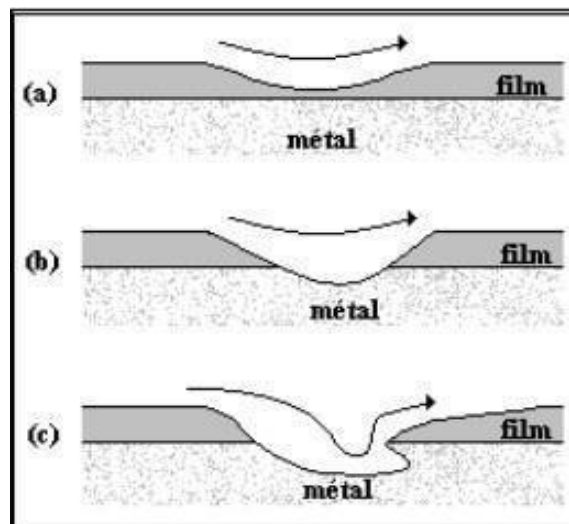


Figure III.15 : Attaque graduelle d'un métal recouvert d'une couche de produits de corrosion :

(a) érosion du film, (b) corrosion sur la surface métallique exposée à

l'environnement, (c) évolution de l'attaque.

Exemples:

- Alliages de cuivre dans l'eau de mer (ceux-ci sont sensibles à des vitesses de quelques m/s).

- Acier faiblement alliés : pompes alimentaires, tuyaux de séchages...

Un acier faiblement allié est recouvert d'une couche d'oxyde de Fe_3O_4 qui le protège légèrement ; à l'équilibre, la vitesse de formation est égale à la vitesse de dissolution. Au fur et à mesure que la vitesse de l'eau augmente, l'oxyde se dissout plus vite qu'il ne se forme et la couche s'amincit, favorisant la corrosion du métal.

La corrosion d'érosion a lieu dans un liquide en mouvement. Cette forme de corrosion a un lien avec la vitesse de passage du fluide, elle se caractérise par un amincissement local du métal qui prend la forme de rayures, de ravinements, d'ondulations, toujours orientées dans la même direction. La vitesse de la corrosion-érosion dépend : J.chen, c.nayar 1998

- De la vitesse de l'eau.
- De la température.
- Du pH.

La figure III.15 montre le mécanisme par lequel se creux se forment sous l'effet de l'érosion.

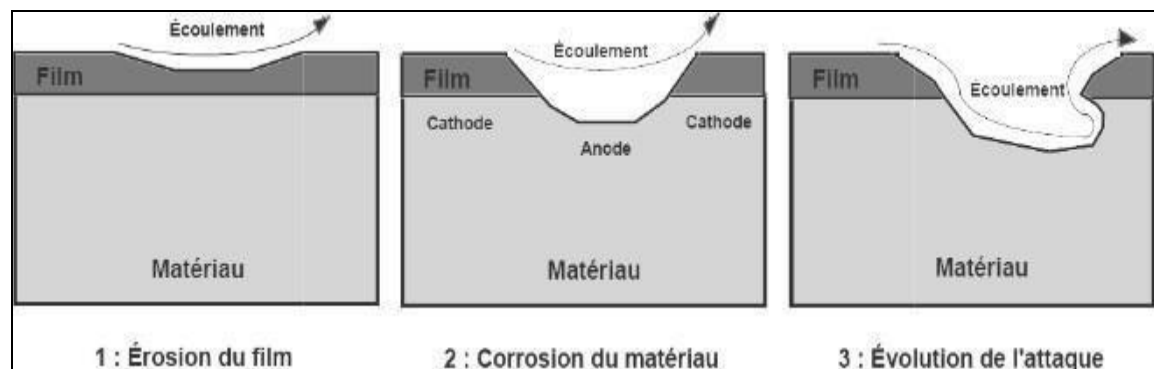


Figure III.15 : Le principe des tourbillons entraînant la formation de creux d'érosion et de corrosion.

Une telle corrosion est étroitement liée aux circuits de chauffage. Le meilleur moyen de lutter contre ce type d'attaque est de faciliter l'écoulement du flux en jouant sur le profil des tubes.

III.14. Approche cinétique de la corrosion:

En pratique, la cinétique de la corrosion peut généralement être contrôlée à l'aide de trois principaux régimes :

a) Le contrôle par des processus de transfert de charge:

Ce premier cas est vérifié lorsque la réaction intervenant à l'interface n'entraîne pas de modification significative de la concentration de l'espèce redox dans l'électrolyte. La relation de Butler-Volmer appliquée à la corrosion peut alors être utilisée pour décrire le comportement du système selon la formule :

$$I = I_{\text{corr}} \left\{ \exp\left[2,3 \frac{(E - E_{\text{corr}})}{\beta_a}\right] - \exp\left[2,3 \frac{(E_{\text{corr}} - E)}{\beta_c}\right] \right\} \quad (21)$$

β_a et β_c (appelés coefficients de Tafel anodique et cathodique, respectivement) sont des paramètres qui font appel aux données cinétiques.

Cette expression, qui donne seulement la valeur du courant du système, est valable dans certaines conditions :

- il n'y a pas de chute chimique dans l'électrolyte et les films de surface.

Il n'y a pas de limitation due à la diffusion,

- le potentiel de corrosion E_{corr} n'est pas trop proche du potentiel réversible de chacune des réactions élémentaires,

- Le métal joue simultanément le rôle d'anode et de cathode,

- Il n'y a pas de réaction électrochimique secondaire, mais un moteur de corrosion exclusif.

La figure suivante illustre le contrôle par des processus de transfert de charge.

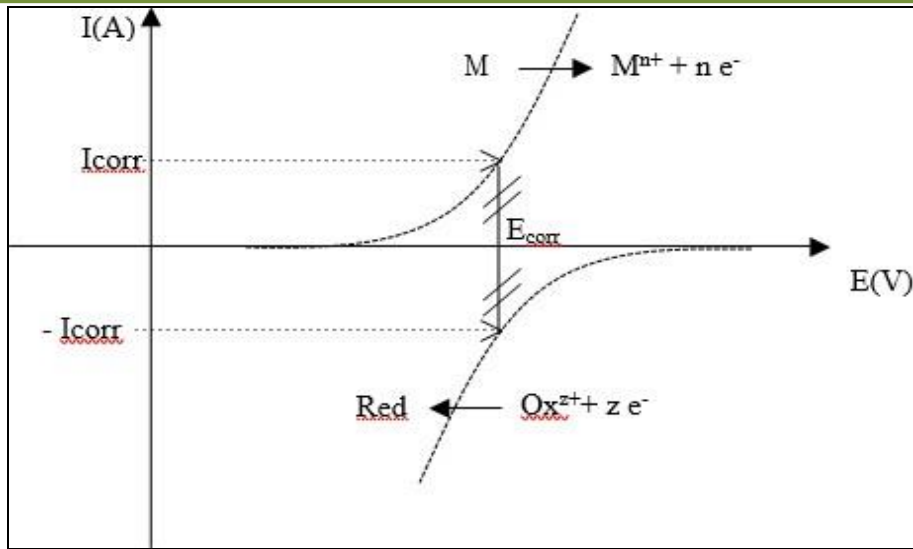


Figure III.16 : Contrôle de la réaction électrochimique de corrosion par un processus de transfert de charge

b) Le contrôle par des processus de transfert de matière:

Ce phénomène est particulièrement présent dans les solutions aérées. De fait, dans un tel environnement, la consommation d'oxygène à l'interface métal/électrolyte n'est pas entièrement compensée par le flux d'oxygène dissous venant du cœur de la solution et la réaction est alors limitée par le transfert de matière. Dans ce cas, la position du film "limite" détermine en règle générale la valeur i_{corr} : le courant de corrosion est directement proportionnel à la teneur en oxygène dissous dans la solution :

$$i_{corr} = i_{lim} = \frac{nFC_{O_2}D_{O_2}}{\delta \cdot 10^{-3}} \tag{22}$$

Avec:

C_{O_2} : concentration en oxygène dissous de la solution (mol/L). D_{O_2} :

coefficient de diffusion de l'oxygène (cm²/s). δ : épaisseur de la couche de diffusion (cm). n : nombre d'électrons mis en jeu (coefficient stœchiométrique des électrons dans la réaction d'électrode) F : constante de Faraday = 96 500 C · mol⁻¹.

La figure suivante illustre le contrôle par des processus de transfert de matière.

Albrecht Naeter, 2004

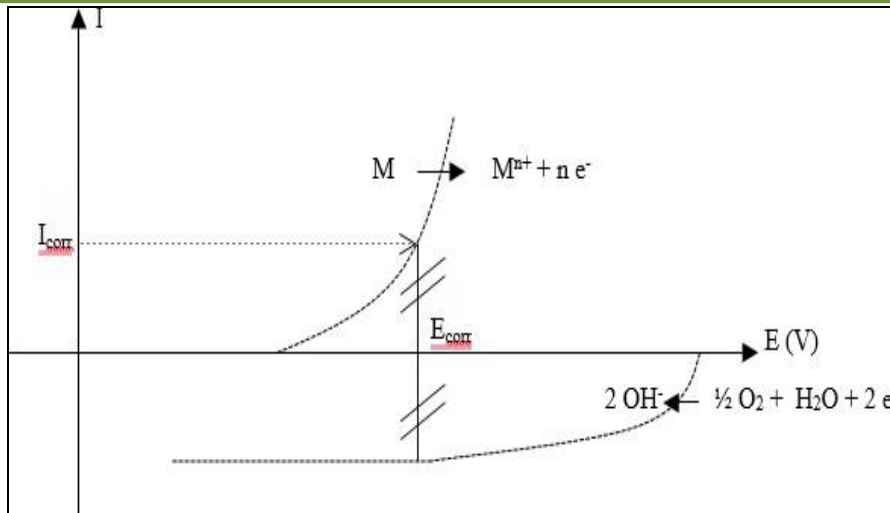


Figure III.17: Contrôle de la réaction électrochimique de corrosion par un processus de transfert de matière (diffusion de l’oxygène dissous par exemple).

c) Le contrôle mixte :

Contrairement au cas dans lequel une étape d'une réaction électrochimique contrôle la cinétique globale dont la réponse du système au signal d'entrée dépend de manière préférentielle de la constante de vitesse de cette étape. En cas de contrôle mixte, la réponse dépend de plusieurs constantes de vitesse et les phénomènes sont beaucoup plus complexes.

Ainsi, la densité de courant totale en régime mixte de diffusion-transfert est donnée par la relation suivante :

$$i = i_a + i_c \left[1 - \frac{i}{i_d} \right] \left[\exp \left(\frac{\alpha n F}{RT} \eta \right) - \frac{i}{i_a} \right] - \frac{i}{i_c} \exp \left(- \frac{(1-\alpha) n F}{RT} \eta \right) \quad (23)$$

Cette relation englobe les termes d'activation et de diffusion pures (i_{corr} , i_a , i_c).

La figure III.18 illustre les courbes de biais cinétiques caractéristiques en mode activation, diffusion et contrôle mixte. Albrecht naeter 2004

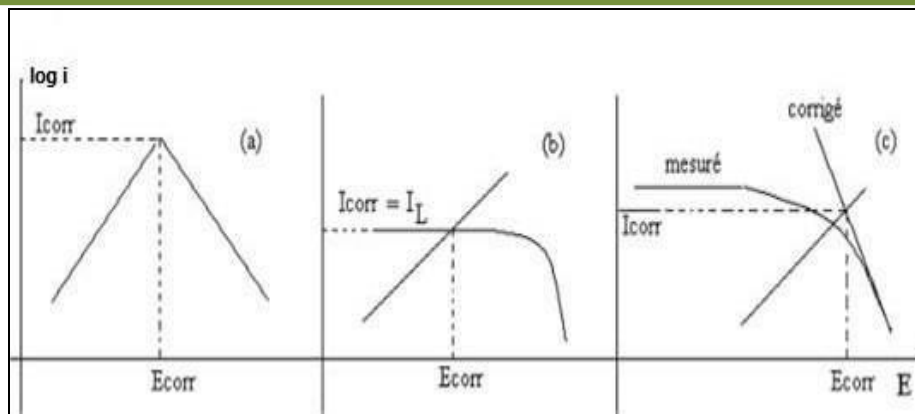


Figure III.18 : Représentation schématique des courbes intensité-potentiel caractéristique d'une cinétique (a) d'activation, (b) sous contrôle de diffusion et (c) sous contrôle mixte.

✦ 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. Albrecht Naeter, 2004

✦ 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.

✦ 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.

- 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 toutes sortes 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 :**

On peut éviter cette corrosion soit :

- par un choix adapté des matériaux;
- en séparant les différents métaux par des pièces sacrificielles peu coûteuses et facilement remplaçables ; En noyant les métaux qui se touchent dans un polymère isolant (c'est la solution adoptée par les électroniciens).

➤ **Corrosion-érosion et corrosion-cavitation :**

Le risque d'apparition de ces phénomènes peut être diminué par une conception appropriée de l'écoulement des fluides, on évitera en particulier les variations brusques des sections et les changements de directions de l'écoulement.

➤ **Corrosion sous contrainte:**

Une intervention doit être entreprise sur la géométrie des structures. En effet, pour une même sollicitation globale appliquée, la distribution des contraintes dans une pièce peut dépendre des géométries.

III.8.2 Moyens de protection.
Etant donné que la corrosion résulte de l'action de deux partenaires, le métal ou l'alliage d'une part, la solution d'autre part, il sera possible de lutter contre ces effets par [34]:

- Protection par revêtements;
- Protection électro-chimique;
- Protection par inhibiteurs de corrosion

✦ **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].

Tableau III.2: Types de revêtements.

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

• **Revêtements métalliques :**

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique, [35]. P. Neau, C. Buthion, 2006. Selon leur comportement, il existe deux types de revêtements métalliques:

Revêtements nobles ou cathodiques Le métal à protéger est moins noble que le revêtement. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur l'acier. Les revêtements plus nobles que le substrat ne doivent donc contenir aucun défaut (figure III.19).

Figure III.19 Revêtement cathodique (cas du nickel sur fer) [35].

Revêtements anodiques sacrificiels

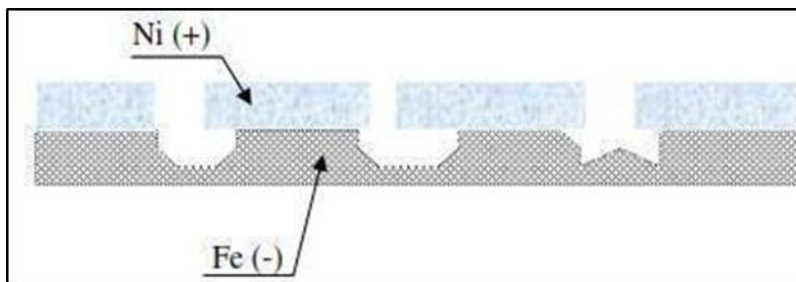


Figure III.19: Le substrat est plus noble que le revêtement, c'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc). (figure III.19)

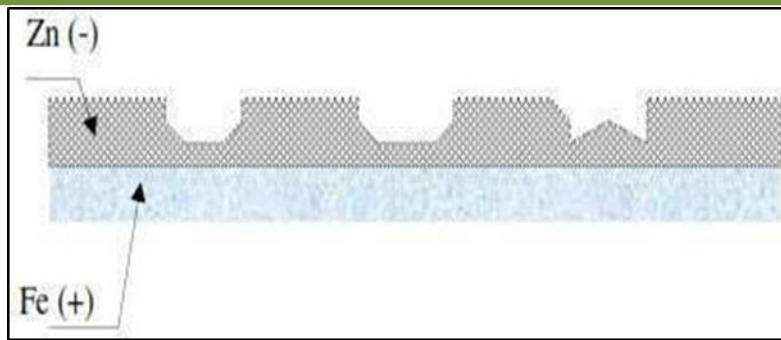


Figure III.20: Revêtement anodique (cas du zinc sur fer) [35].

Revêtements non métalliques:

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou 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 thermo-plastiques (PVC, propylène, etc.);
 - Les caoutchoucs (naturels ou synthétiques);
 - Les thermo-durcissables (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; P. Neau, C. Buthion, 2006

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 définies appliquées au pistolet, suivies 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.

Protection électro-chimique :

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 cathodique :

Elle consiste à abaisser le potentiel (métal milieu) de manière à l'amener dans sa zone d'immunité ($E \leq E_{prot}$). 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 inférieur 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].

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 obtenir une protection efficace, il est essentiel de 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. P. Neau, C. Buthion, 2006.

La protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitriques, sulfuriques), 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].

Inhibiteurs de corrosion:

Selon la définition donnée par la National Association of Corrosion Engineers (NACE), un inhibiteur de corrosion est une substance chimique qui, ajoutée à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu, sans modifier la nature de ce dernier [38].

Les inhibiteurs de corrosion peuvent d'être classés de diverses manières, nous citons les classes les plus importantes :

- **1°/Le caractère électro-chimique:**

On distinguera alors les inhibiteurs anodiques, cathodiques ou mixtes. L'inhibiteur forme une couche barrière sur la surface métallique, induisant la

Chapitre IV

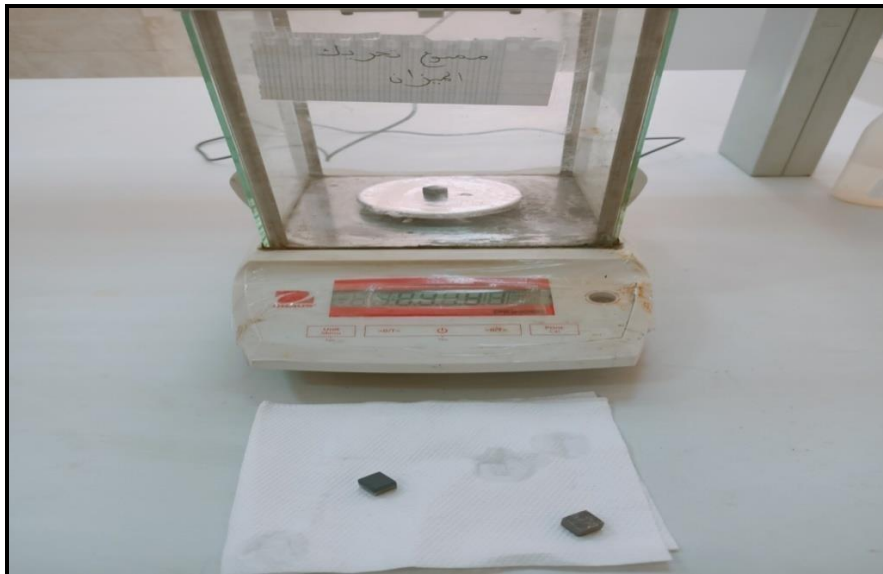
Travail experimental

Chapitre IV : Travail experimental**VI.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:

La corrosion est étudiée sur trois échantillons en fonte de différentes compositions chimiques le poids a été mesuré avec une balance de type KERN (figure 1) L. H. Hansen 2001



FigureIV-1:montre les pieces après le nettoyage

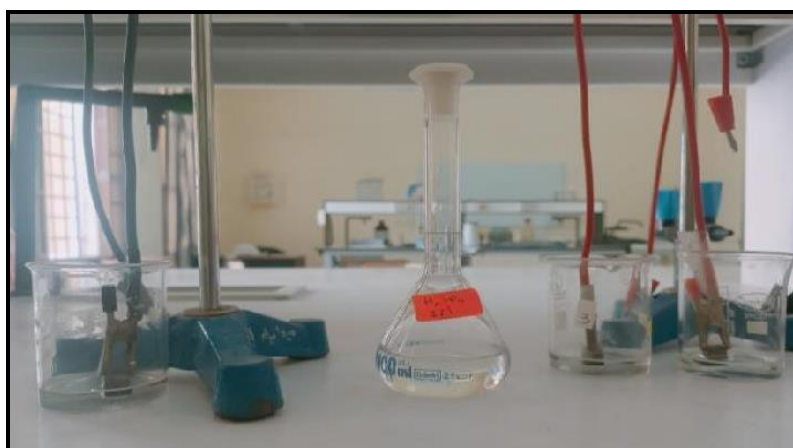
VI.3. Solution de H₂SO₄:

Après nettoyage, chaque échantillon a été placé dans un récipient contenant une solution de H₂SO₄, HCL et d'eau de mer à une concentration de 1 mol. Nous laissons chaque morceau dans la solution pendant une certaine période.

D'après les tableaux suivants:



FigureIV.3.1:L'échantillon est plongéH₂SO₄



FigureIV2:Montre que l'échantillon est plongé HCL

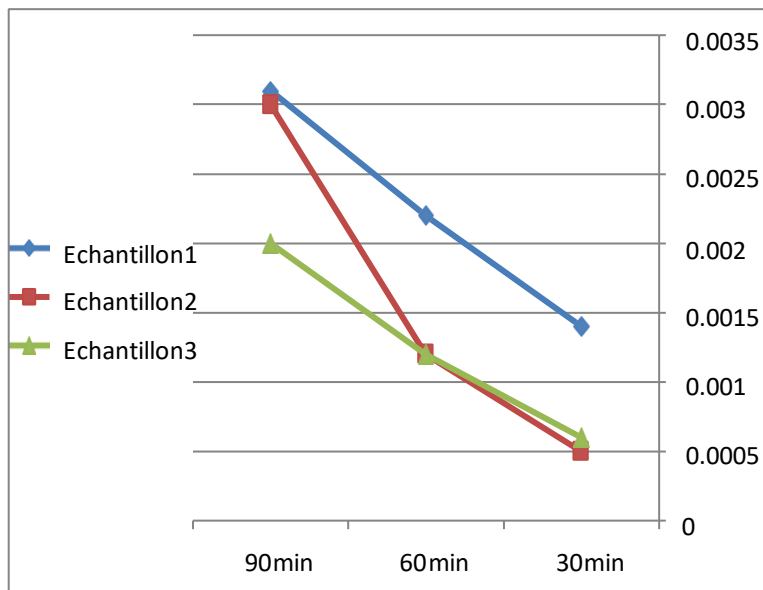
Tableau VI-2 :La masse (g) des échantillons avant leur mise en solution H₂SO₄

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
Masse(g)	6.3863	6.5736	7.2152

VI.3.1-Perte de masse:

Tableau VI-3: perte de masse Après l'avoir mis dans l'acide H₂SO₄

Temps (min) Echantillon	30 min	60 min	90 min
Echantillon1	0.0681	0.0489	0.0934
Echantillon2	0.0112	0.0416	0.0894
Echantillon3	0.0012	0.0023	0.0043



FigureIV.3.2:Masse d'échantillon en fonction du temps

VI.3-2Vitesse de corrosion:

calculer la vitesse de corrosion, il faut appliquer la relation

$$V = -\Delta m / S.t \text{ (g/mm}^2\text{h)}$$

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

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
Surface inférieure mm ²	100	100	100
Surface latérale *4 mm ²	192	168	164
Superficietotale mm ²	292	268	264

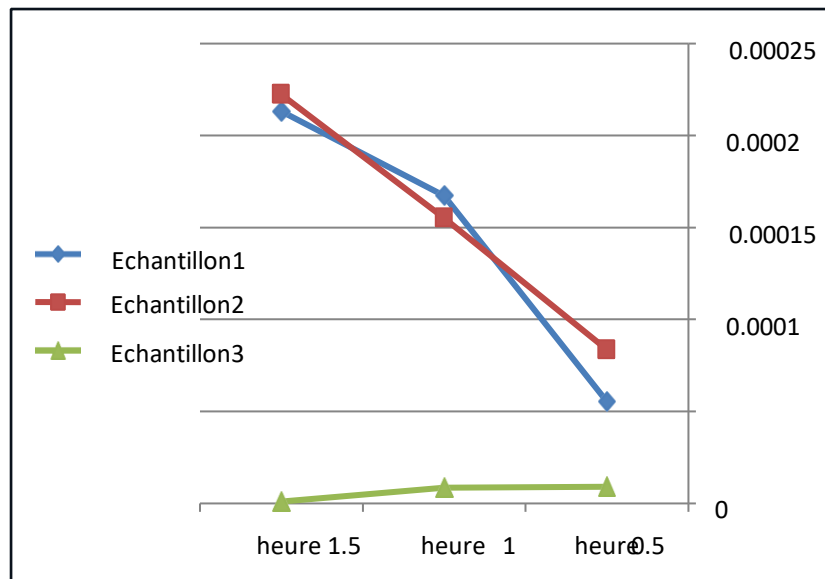
Tableau VI-4:Tableau montrant le taux de corrosion

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t(\text{g/mm}^2\text{h})$	0.0000554	0.00008358	0.000009091

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t(\text{g/mm}^2\text{h})$	0.0001674	0.0001552	0.000008712

Tableau VI.4.2: perte de masse Après l'avoir mis dans l'acide HCL

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t(\text{g/mm}^2\text{h})$	0.0002132	0.0002223	0.00001061



FigureIV.3.3:Lecture de la vitesse d'usure des pièces en fonction du temps

Après avoir nettoyé les échantillons et les avoir trempés dans une solution H_2SO_4 , on remarque sur les courbes et résultats d'une perte de poids des échantillons, que l'on remarque dans la première courbe après une demi-heure dans l'acide, une perte de l'échantillon 2 de 0,0012, inférieure à l'échantillon 1, et l'échantillon 3, bien inférieur à l'échantillon 1, une perte de 0,0681. On remarque sur la courbe de vitesse de réaction que l'échantillon 3 est beaucoup moins réactif que les échantillons 1 et 2. Après l'avoir séché, nous le remettons dans une solution. Au bout d'une heure, nous remarquons que l'échantillon 1 a perdu une quantité de 0,0489, l'échantillon 2 de 0,0416 et l'échantillon 3 de 0,0023. Nous remarquons sur la courbe de vitesse de réaction une augmentation de la vitesse. pour les échantillons 1 et 2 et une légère diminution de vitesse pour l'échantillon 3. Nous répétons le processus et remarquons, après une heure et demie, une perte de l'échantillon 1 de 0,0934, de l'échantillon 2 de 0,0894 et de l'échantillon 3 de 0,0043. D'après ce que nous remarquons dans ces résultats, l'échantillon 2 perd moins que l'échantillon 1, en raison de la présence d'additifs dans l'échantillon 2, qui est (NI-MO-V), et l'échantillon 3 perd également beaucoup moins que le reste des échantillons, ce qui signifie que nous concluons que Cr est un facteur supplémentaire expliquant l'absence de perte dans l'échantillon. Autres échantillons. L.khtache2008

VI.4. Solution :HCL

Tableau VI.5: Letableaumontre lamasse(g) des échantillons avant d'être placés dans la solution HCL

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
Masse(g)	6.2310	6.4244	7.2065

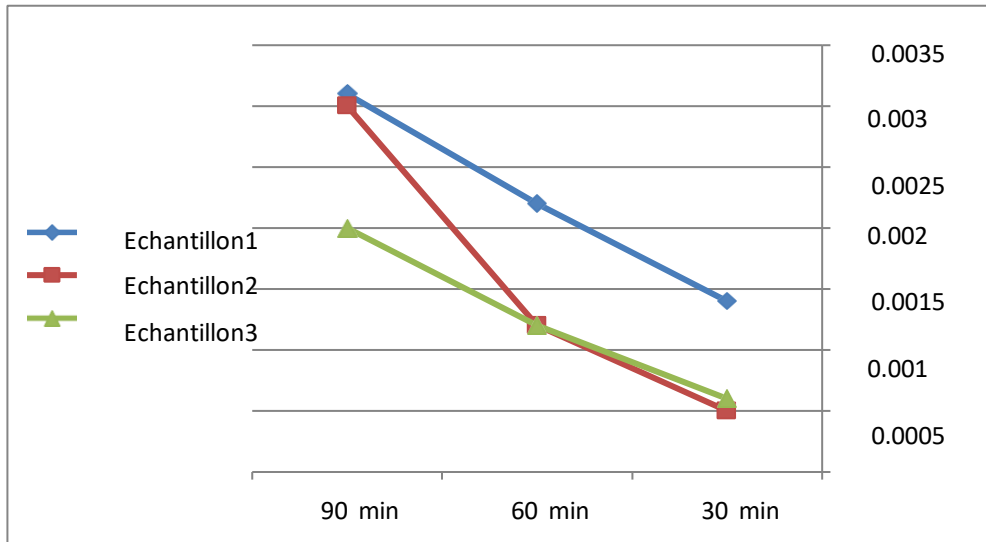


Figure IV.4.2: Un graphique montrant la masse des échantillons en fonction du temps

VI.5. Résultats et discussion:

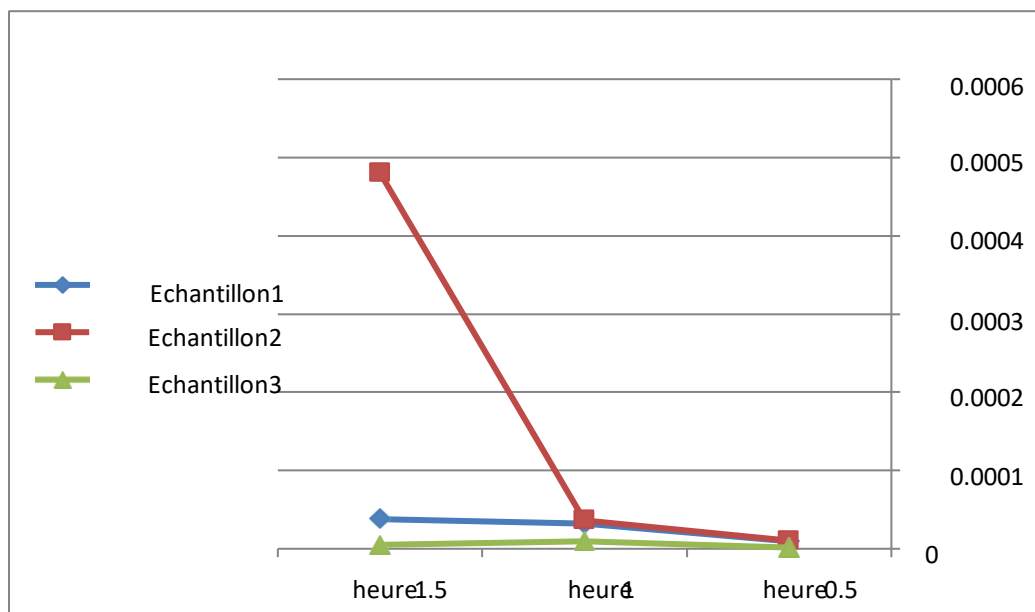
Tableau VI.7: Tableaumontrant letauxdecorrosion

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
Surface inférieure mm2	100	100	100
Surface latérale *4 mm2	192	168	164
Superficieltotale mm2	292	268	264

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t(\text{g/mm}^2\text{h})$	0.00000958	0.00001044	0.00000151

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t(\text{g/mm}^2\text{h})$	0.0000321	0.0000365	0.00000946

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t(\text{g/mm}^2\text{h})$	0.00003789	0.0004801	0.00000479



FigureIV.4.3:Un graphique montrant la masse des échantillons en fonction du temps

Nous avons répété le processus avec un pourcentage de la solution HCL, et ce que nous remarquons sur les courbes après une demi-heure est une légère perte de pourcentage pour l'échantillon 3 d'un montant de 0,0002 par rapport aux échantillons 1 et 2 d'un montant de 0,0017 et 0,0014, cependant, la vitesse de réaction est presque similaire, et la plus petite d'entre elles est l'échantillon 3. Ensuite, nous avons séché à nouveau les échantillons et les avons replongés dans une solution, et après une heure, nous avons remarqué une

augmentation des pertes pour les échantillons 1 et 2 de 0,0098 et 0,0025 et pour l'échantillon 3 de 0,0025. Nous remarquons également dans la courbe de vitesse de réaction. une augmentation de la vitesse de réaction d'un pourcentage pour les trois échantillons.

De plus, dans le même processus, après une heure et demie, nous remarquons une plus grande augmentation de la perte en pourcentages pour 1 et 2 de 0,0176 et 0,0166. Quant à l'échantillon 3, nous remarquons une perte inférieure de 0,0019.

VI.5.1. Une expérience EAU DE MER

Tableau VI.8: Le tableau montre la masse (g) des échantillons avant d'être placés dans la solution EAU DE MER

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
Masse(g)	6.2019	6.4053	7.2059

Tableau VI.9: perte de masse Après l'avoir placé dans l'eau de mer

VI.5.2. Résultats et discussion

Temps (min) / Echantillon	Jour 1	Jour 2	Jour 3
Echantillon1	0.0014	0.0012	0.0031
Echantillon 2	0.0005	0.0012	0.0030
Echantillon 3	0.0006	0.0012	0.0020

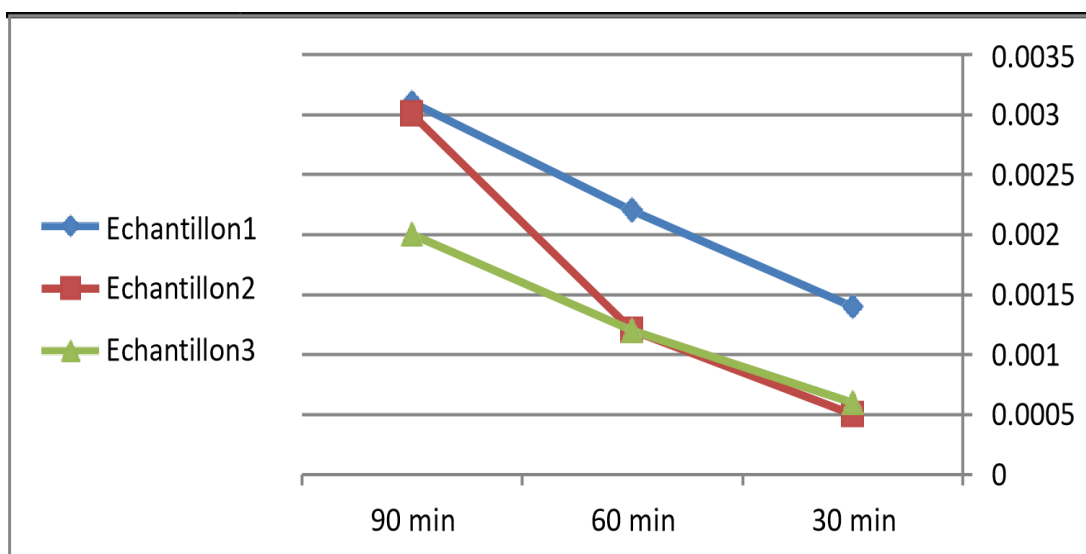


Figure IV.5.1: Un graphique montrant la masse des échantillons en fonction du temps

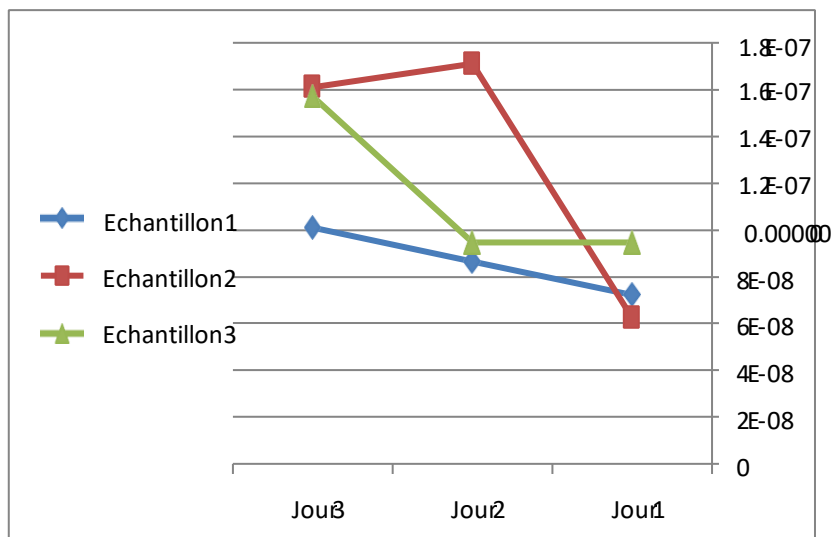
Tableau VI.10: Table au montrant le taux de corrosion

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
Surface inférieure mm2	97.02	99	100
Superficietotale mm2	289.02	267	264

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t$ (heure)	0.00000007208	0.0000000624	0.0000000946

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t$ (heure)	0.0000000864	0.000000171	0.0000000946

	Echantillon1	Echantillon2	Echantillon3
$V=\Delta m/S.t$ (heure)	0.0000001009	0.000000161	0.000000157



Nous avons répété le processus avec un rapport pour la solution EAU DE MER, et d'après les courbes que nous remarquons après une journée, il y a une petite perte significative pour l'échantillon 1 de la quantité de 0,0014 par rapport aux échantillons 1 et 2 de la quantité de 0,0005 et 0,0006. Quant au rapport de la vitesse de réaction, on remarque que l'échantillon 2 est inférieur aux échantillons 1 et 3.

Ensuite, nous avons séché à nouveau les échantillons et les avons plongés dans l'eau de mer, et après deux jours, nous avons remarqué une augmentation de la perte de l'échantillon 1 de 0,0022, et par rapport aux échantillons 2 et 3, nous avons également remarqué une perte importante. la courbe de vitesse de réaction présente une forte augmentation en pourcentage pour l'échantillon 2, par rapport aux autres échantillons.

De plus, dans le même processus, après trois jours, nous remarquons une nouvelle augmentation de la perte pour les échantillons 1 et 2 de 0,0031 et 0,0030, et pour l'échantillon 3 de 0,0020.

VI.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mené trois expériences sur trois morceaux de fer solide de masses différentes. Tout d'abord, nous avons immergé la surface inférieure des échantillons dans une solution de H_2SO_4 avec des changements de temps, et nous avons observé une différence dans les masses des échantillons. Plus le temps variable est long, plus la diminution des masses d'échantillon est importante. Grâce à cette observation, nous concluons qu'une corrosion du fer s'est produite, et à partir de là nous avons calculé le pourcentage de corrosion, et de là nous pouvons conclure que les additifs ont joué un rôle important dans la prévention de la corrosion du fer .

Conclusion

CONCLUSION

Conclusion :

Les travaux réalisés dans cette thèse sont liés à l'évaluation des propriétés de la fonte GS destinée aux mâts d'éoliennes. L'étude des types de corrosion, qui constitue l'un des plus grands risques auxquels sont exposés les mâts d'éoliennes, en plus de connaître les caractéristiques de la fonte GS prévue et les matériaux fabriqués, permet d'éviter et de réduire les problèmes de corrosion. Dans notre étude, nous avons calculé le taux de corrosion à travers des expériences en laboratoire sur trois échantillons de fonte GS dans le but de connaître la résistance du mât de l'éolienne, ce qui nous a amené à conclure que ces additifs sont un facteur essentiel pour empêcher la corrosion de se produisant.

Perspectives :

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

**Références
bibliographiques**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographies :

- [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, J.T.Erikson, J.Salonen, H. Vihriälä, 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 D3960.
- [7] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans Un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL) 2012 .
- [8] R.Swisher, C.Realde Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power Comme soif d'âge », proceedings of the IEEE, vol.89, N°.12, December 2001, pp.1757-1764.
- [9] Loucif Mourad, « Synthèse des 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 », Risø national Laboratory, Roskilde, Denmark, décembre 2001
- [11] Énergie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré LeGourières, 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. KHATTACHE, « Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique,

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

2008.SATINFO(SociétéduGroupeSonelgaz),«Programmedesénergiesrenouvelableset de l'efficacité énergétique », Mars 2011

[10] [10] Syndicat des énergies renouvelables, www.enr.fr, dernière révision du document : juin 2012.

[11] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Éoliennes en milieu urbain - État de l'art, janvier 2006, pp. 1-129

J.Chen,C.Nayar,L.XU,«DesignandFEanalysis Fan-out rotor PM generator for directly coupled wind turbine applications", proceedings of the IEEE Industry Applicationsconference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394

[11] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans Un réseau de moyenne tension", thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL) 1996.

[12] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.

[13] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.

[14] J.W.Smith,J.A.Taylor,D.L.Books,R.C.Dugan, «Interconnectionstudiesforwind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.

[15] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, «Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado,USA, June 6 à12, 2004.

[16] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems », 2002. 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC 2002, paper N° 20027, pp. 716-724."

[17] <http://ooxygene.alwaysdata.net/eolienné.html>ernardMulton, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14

[16] : J.Benard, A.Michel, J.Philibert et J.Talbot, Métallurgie Générale, Masson Editeurs, 1969.

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 : Énergies renouvelables, Énergie éolienne, Centrales électriques, Production d'électricité.

Abstract :

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

Keywords: Renewable energy, Wind energy, Power plants, Electricity production

المخلص:

نهتم في هذه الدراسة بمدى مقاومة تآكل الفولاذ المستخدمة في صناعة صاربية توربينات الرياح التي لها آفاق وأمال كبيرة في مجال الطاقة المتجددة. حيث تم معرفة ودراسة المواد المركبة للصاربي ودراسة أنواع ومقاييس التآكل للمواد, إضافة إلى تجربة حول مدى تأثير التآكل على الفولاذ المصنع لصاربية توربينات الرياح.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة, طاقة الرياح, محطات الطاقة, إنتاج الكهرباء