

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE

MASTER

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie Mécanique

Parcours: Master

Spécialité: Énergétique

Thème

Étude théorique d'une éolienne

Préparé par:

BEKHOUCHE Fouad et RAHOU Mohamed

Soutenu publiquement le: 27 / 06 / 2022, devant le jury composé de:

M. MEKROUSSI Said	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Président
M. HAMMOU Mohmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Examineur
M. BEY Mohamed	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Examineur
M. ABED Belkacem	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Encadrant

Année universitaire: 2021 - 2022

Remerciements

*On remercie **Allah** le tout puissant de nous avoir donné l'opportunité, la santé, et la*

Volonté d'entamer et de terminer ce mémoire dans les bonnes conditions.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et

*l'encadrement de **Mr ABED BELKACEM**. On le remercie pour la qualité de son encadrement
exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous adressons nos remerciements à Monsieur le Président de jury et Messieurs les membres de jury
d'avoir accepté de nous faire l'honneur de juger ce travail.*

*Nos profonds remerciements s'adressent également à tous nos enseignants du département du génie
mécanique pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont*

*su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles et pour le travail énorme qu'il
effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.*

*Nos remerciements vont également à l'endroit de tous ceux qui ont participé de près ou de loin à
l'élaboration de ce travail.*



Dédicace

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail réalisé grâce à l'aide de dieu tout

Puissant toute personne que j'aime et les plus chères au monde :

A mes très chers parents pour leurs sacrifices afin de réussir dans la vie A

vous mes frères et Sœurs.

À tous mes amis de promotion de 2eme année Master génie mécanique toute

personne qui occupe une place dans mon cœur

qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

RAHOU Mohamed



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très cher parents pour leur confiance, leur soutien, leur sacrifices,.....merci infiniment

A tous les membres de ma famille petite et grande.

A tous mes amis.

A tous les gens qui m'ont aidé durant tout mon cursus d'étude.

*A mon cher fils **Yannis**.*

BEKHOUCHE Fouad



Sommaire

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace	I
Sommaire	II
Nomenclature	III
Liste des figures	IV
Introduction générale	01

CHAPITRE I : Généralités sur les Energies Renouvelables

I-1. Introduction	03
I-2. Définition Energie renouvelable.....	03
I-3. Historique	03
I-4. Différents types de l'énergie renouvelable.....	04
I-4-1. Energie solaire	04
I-4-1-1. Energie solaire thermique.....	05
a. Principes de fonctionnement solaire thermique	05
b. Types de capteurs thermiques	06
1. Les capteurs plans vitrés.....	06
2. Les capteurs tubes vitrés sous vide.....	06
3. Les capteurs hybrides	06
I-4-1-2. Solaire thermodynamique.....	07
a. Principe de la solaire thermodynamique.....	07
b. Les types de centrales solaires thermodynamiques à concentration	07
1. Centrales à miroirs cylindra-paraboliques (linéaire)	08
2. Centrales solaires à miroirs de Fresnel (linéaire)	08
3. Centrales à tour (par foyer).....	08
4. Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling.....	09
I-4-1-3. Energie solaire photovoltaïque	09
a. Principe de fonctionnement	10

Sommaire

b. Les types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	11
1. Les cellules monocristallines.....	11
2. Les cellules poly cristallines.....	11
3. Les cellules amorphes.....	11
I-4-1-4.Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	11
I-4-2.Energie biomasses	12
I-4-2-1.Principales catégories d'énergies relatives à la biomasse	13
I-4-2-3.Types de biomasse.....	13
a. Biomasse sèche.....	13
b. Biomasse humide	13
c. La production de biocarburant.....	13
I-4-2-4.Avantages et inconvénients	14
I-4-3.Energie hydraulique.....	14
I-4-3-1.Principe de Fonctionnement d'énergie hydraulique.....	15
I-4-3-2.Les types de l'énergie hydraulique.....	16
a. Energie marémotrice	16
b. Energie hydrolienne	16
c. Energie des vagues	17
d. Energie osmotique.....	17
I-4-3-3.Avantages et inconvénients	17
I-4-4.Energie géothermique.....	18
I-4-4-1.Principe de fonctionnement de la géothermie	19
I-4-4-2.Types d'énergie géothermique en fonction de la température de l'eau expulsée.....	20
a. Énergie géothermique de haute température	20
b. Énergie géothermique de basse température	20

Sommaire

c. Énergie géothermique de température moyenn	20
d. Énergie géothermique de très faible température.....	21
I-4-4-3.Avantages et inconvénients	21
I-4-5.Energie éolienne	22
I-4-6.Conclusion	22
CHAPITRE II : Etude sur les éoliennes	
II-1.Introduction	23
II-2. Historique	23
II-3. Définitions du vent	24
II-4.Origine du vent.....	24
II-4-1.Effets des montagnes.....	24
II-4-2.Effets de la végétation et de la rugosité du paysage.....	25
II-4-3.Brises de terre.....	25
II-4-4.brises de mer.....	26
II-5. Définition des éoliennes	26
II-6.Principe de l'éolienne.....	27
II-7.Constitution d'une Eolienne	27
II-7-1. La fondation	28
II-7-2.Le mât.....	28
II-7-3.Le rotor	29
II-7-4.La nacelle	29
II-8. Développement de l'énergie éolienne	31
II-9.Descriptif d'une éolienne	31
II-10.Caractéristiques	32
II-10-1.Les éoliennes terrestres	33
II-10-2.Les éoliennes en mer posées	33
II-10-3.Les éoliennes en mer flottantes	34
II-11.Classification des éoliennes.....	34

Sommaire

II-11-1.Les éoliennes à axe vertical.....	35
II-11-1-1. Les types d'éoliennes à axe vertical.....	35
a. La traînée différentielle (les éoliennes de Savonius).....	35
b. Variation cyclique d'incidence (les éoliennes de Darrieus	36
II-11-1-2.Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical	37
II-10-2.Eoliennes à axe horizontal.....	37
II-11-2-2.Les types d'éoliennes à axe horizontal.....	38
a. Eoliennes lentes	38
b. Eoliennes rapides (Aérogénérateurs)	38
II-11-2-3.Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal.....	39
II-12. L'énergie éolienne dans le monde	40
II-13.L'énergie éolienne en Algérie	40
II-14.Moulins à vent dans la ville.....	42
II-15.Éolienne de mer.....	43
II-16.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	44
II-17.Mesure du vent.....	45
II-18.Raccordement au réseau électrique	47
II-19.Différents types de réseaux	48
II-19-1. Réseau parallèle.....	48
II-19-2. Réseau temporaire	48
II-19-3.Réseau autonome.....	48
II-20. Conclusion.....	48

CHAPITRE III : Calcul théorique de la Puissance

III-1. Énergie fournie par le vent	50
III-1-1. Énergie cinétique	50
III-1-2.Energie cinétique du vent	50
III-2-. La masse volumique de l'air	50

Sommaire

III-2-1. Variation de la masse volumique de l'air	50
III--2-1-1. La masse volumique de l'air sec en fonction de la température	50
III -2-1-1. La masse volumique de l'air sec en fonction de la l'altitude	52
III-3. Énergie théoriquement récupérable	54
III-3-1. Puissance théoriquement récupérable	54
III-4. Les éoliennes détournent le vent	56
III-4-1. Limite de Betz/Formule de Betz	56
III-4-2. Démonstration de la limite de Betz	56
III-5. Répartition de la vitesse du vent	59
III-5-1. Construction	59
III-5-2. Fonction de probabilité de densité de Wei bull	60
III-5-3. La distribution de Rayleigh	61
III-6. Vitesse angulaire du rotor	61
III-6-1. Vitesse tangentielle	61
III-6-2. Vitesse du vent créé par le déplacement de la pale	62
III-6-3. Vitesse relative	62
III-7. La vitesse spécifique	63
III-8. Rendements	64
Conclusion générale	67
Annexe	
Référence bibliographique	
Résumé	

Nomenclature

Liste des symboles

m	Masse du volume d'air (en kg)
v	Vitesse instantanée du vent (en m/s)
E_c	Energie cinétique (en joules)
v	volume d'air occupé (en m ³)
ρ	masse volumique (en kg/m ³)
P	pression de l'air (Pa)
n	nombre de mol (en mol)
R	constante universelle des gaz parfaits (J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹)
T	température (K).
M	masse molaire de l'air (kg/mol)
g	Accélération de pesanteur standard(m/s ²)
a	Gardient de température vartical (k/m)
Z	altitude(m)
P	Puissance récupérable (Watt)
ρ_0	masse volumique de l'air (kg/m ³)
S	surface du dispositif de récupération (m ²)
vS	Débit volumique d'air (m ³ /s)
R	rayon de pale (m)
V	vitesse du vent (en m/s)
F	la force (N)
C_p	coefficient de puissance
k	paramètre de forme
c	paramètre d'échelle
ω	vitesse angulaire (en rad/s)
f	fréquence de rotation du rotor (tour/min)
U	vitesse du vent dû au déplacement de la pale ou vitesse tangentielle (en m/s)

Nomenclature

r	distance du point considéré à l'axe de rotation (en m)
n	Fréquence de rotation du rotor (tour/min)
v_r	vitesse relative de la pale (en m/s)
λ	Vitesse spécifique (sans unité)

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralités sur les Energies Renouvelables

Figure I-1 : Energie solaire.....	04
Figure I-2 : Principes de fonctionnement solaire thermique	05
Figure I-3 : capteurs plans vitrés	06
Figure I-4 : principe de la solaire thermodynamique	07
Figure I-5 : Centrales solaires à miroirs de Fresnel.....	08
Figure I-6 : Centrales à tour.....	09
Figure I-7 : Centrales à miroir parabolique	09
Figure I-8 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.....	10
Figure I-9 : Energie biomasses	12
Figure I-10 : usine biomasse	13
Figure I-11 : Energie hydraulique	15
Figure I-12 : Principe de Fonctionnement d'énergie hydraulique.....	16
Figure I-13 : Energie Marémotrice.....	16
Figure I-14 : Barrage Hydraulique	17
Figure I-15 : Energie géothermique	19
Figure I-16 : Principe de la géothermie	19
Figure I-17 : Géothermie de haute température	20
Figure I-18 : Géothermie basse température	20
Figure I-19 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	22

CHAPITRE II : Etude sur les éoliennes

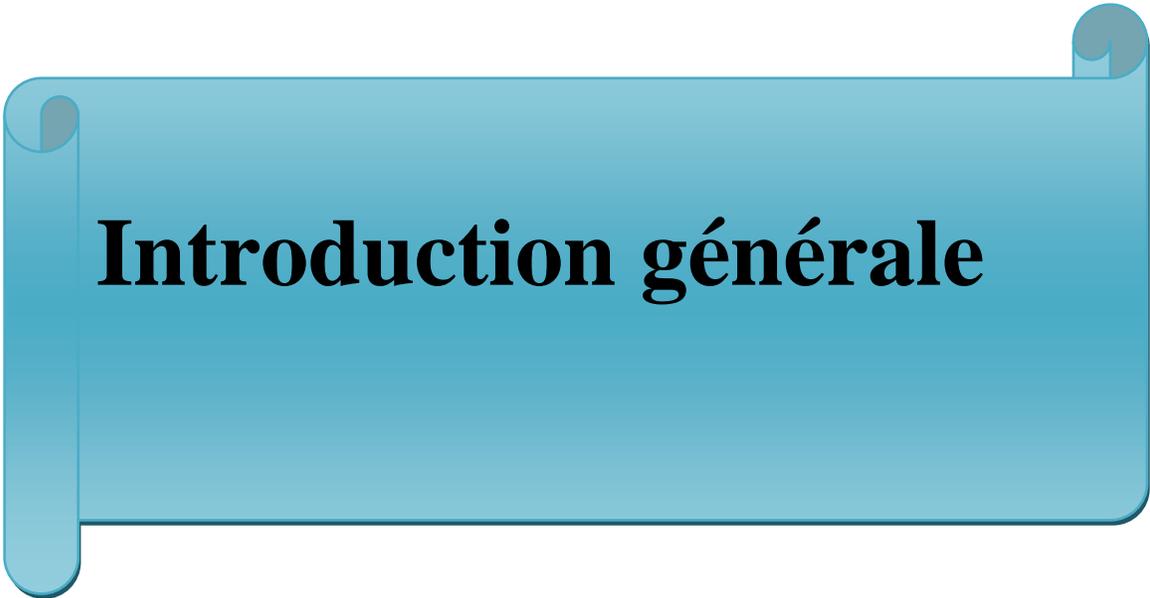
Figure II-1 : Le moulin perse (à gauche) et le moulin à vent (à droite)	24
Figure II-2: Effet d'ondulation avec amortissement sur un vent à cause d'une montagne	25
Figure II-3 : Brise de terre (bas).....	26
Figure II-4 : Brise de mer (haut).....	26
Figure II-5 :Organigramme d'une station d'énergie électrique par aérogénérateur.....	28
Figure II-6: fondation d'une éolienne.....	28
Figure II-7: un mât d'une éolienne	29
Figure II-8: un rotor d'une éolienne	29
Figure II-9: Principaux composants d'un aérogénérateur	30

Liste des figures

Figure II-10 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW	31
Figure II-11 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur	32
Figure II-12 :Les éoliennes terrestres.....	33
Figure II-13 :Les éoliennes en mer posées.....	33
Figure II-14 :Les éoliennes en mer flottantes.....	34
Figure II-15 : Classification des éoliennes	34
Figure II-16: éoliennes à axe vertical	35
Figure II-17: Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius	36
Figure II-18: Schéma de principe du rotor de Darrieus.....	36
Figure II-19: Eoliennes à axe horizontal	38
Figure II-20 : Configuration à axe horizontal.....	39
Figure II-21: Evolution de la puissance électrique d'origine éolienne installée dans le monde	40
Figure II-22: Eolienne de 100 kW.....	41
Figure II-23: structure du parc de la production nationale en MW	42
Figure II-24: vent dans la ville	43
Figure II-25 : Éolienne de mer	43
Figure II-26 : la couleur claire indique les zones les plus ventées	44
Figure II-27 : Anémomètre et girouette.....	46
Figure II-28 : Satellite Quissac qui mesure les vents grâce à un diffus mètre	48
Figure II-29 : Raccordement au réseau électrique.....	48

CHAPITRE III : Calcul théorique de la Puissance

Figure III-1 : la masse volumique de l'atmosphère en fonction de la température.....	52
Figure III-2 : La masse volumique de l'atmosphère en fonction de l'altitude	54
Figure III-3 : Puissance du vent en fonction de la vitesse.....	55
Figure III-4 :Tube d'air	57
Figure III-5 : La Limite de Betz en fonction de la vitesse de vent.....	59
Figure III-6 : La distribution de Rayleigh	61
Figure III-7 :La vitesse relative	62
Figure III-8 : La vitesse relative de la pale en fonction de la vitesse de vent	63
Figure III-9 : La vitesse spécifique en fonction de la vitesse de vent	64



Introduction générale

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE:

La consommation d'énergie au cours du siècle dernier a considérablement augmenté en raison de l'industrialisation massive. Les prévisions de besoins énergétiques pour les années à venir ne font que confirmer, voire prolonger, cette tendance, compte tenu notamment de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques.

Une grande partie de ces ressources sont aujourd'hui des combustibles fossiles : pétrole, charbon, gaz naturel. Bien que diversifiées et très abondantes, ces ressources ne sont pas inépuisables et leur exploitation ne peut durer plus d'un siècle. Mais la sécurité énergétique à long terme des pays du monde n'est pas le seul danger posé par l'utilisation des énergies fossiles, leur utilisation génère une quantité considérable de dioxyde de carbone, un gaz en partie responsable de l'effet de serre. Cet effet de serre met en danger de nombreuses populations dans le monde et la stabilité géopolitique même de certaines régions du globe pourrait être compromise.

Et dans le but de répondre à la consommation d'électricité continuellement croissante, et pour fournir une énergie propre, sûre et compétitive, la tendance va vers l'utilisation des sources d'énergies de différentes natures en termes de concept et source d'énergie notamment énergies renouvelables.

Cette mémoire porte donc sur la modernisation de ces énergies en agissant sur les éléments de contrôle et de puissance qu'utilisent tout type de source (fossile ou renouvelable), les énergies renouvelables (soleil, éolien, hydroélectricité, biomasse ou chaleur naturelle) le permettent. obtenables après transformation d'énergie mécanique, d'électricité, de chaleur ou de carburant, permettent de réduire la consommation de combustibles fossiles ou fissiles, et donc de réduire la protection de l'environnement et l'impact socio-économique de nos besoins énergétiques.

Les énergies renouvelables comprennent un grand nombre de systèmes différents selon la ressource utilisée et la forme d'énergie obtenue. Les évolutions observées ces dernières années concernent à la fois l'amélioration de l'efficacité de la transformation et la réduction des coûts de production de l'énergie des services publics, la qualité des services énergétiques et l'augmentation du confort d'exploitation. Nos besoins, mais leur part dans le bilan énergétique dépend de l'espace mis à disposition, de l'investissement dans leurs équipements et de la réduction de nos consommations.

Dans cette mémoire, nous avons divisé en trois chapitres principaux Au:

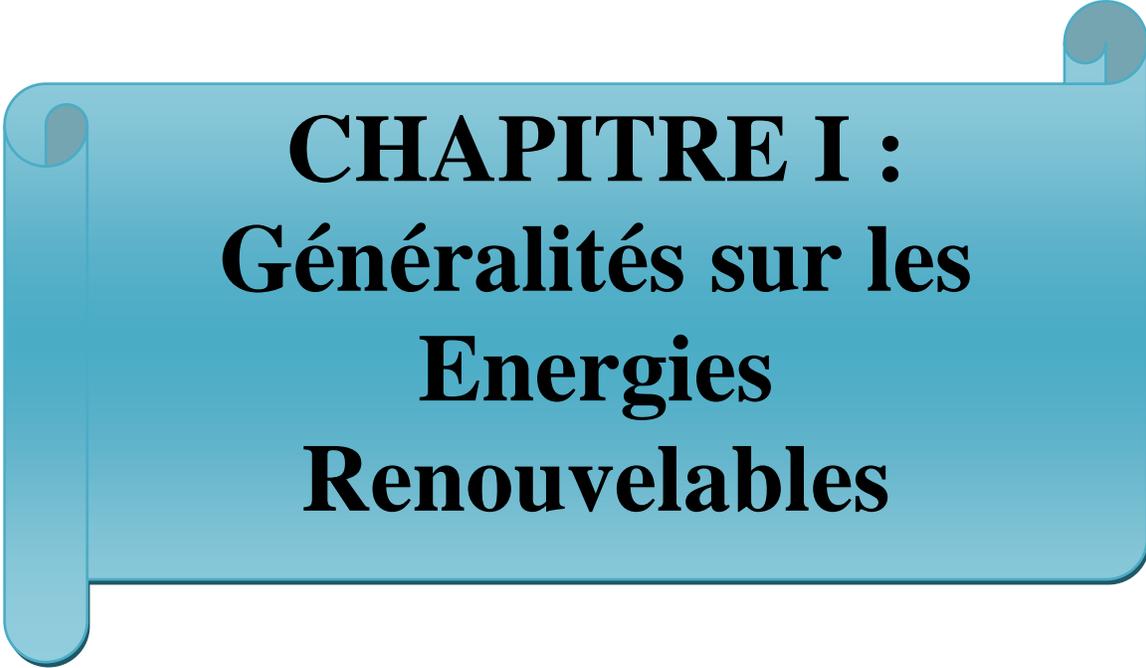
Chapitre I : On a donné un bref aperçu sur les différentes énergies renouvelables, les sources d'énergies renouvelables sont fréquentes et variées. Parmi les plus connues, se trouvent :

Hydraulique, Le solaire, éolienne, La géothermie, La biomasse...

Introduction Générale

Chapitre II : de cette mémoire est consacré à l'étude de l'énergie éolienne. Nous partons de la première étape avec l'éolien, développons l'éolien, étudions la partie mécanique des éoliennes et leurs zones de fonctionnement, mentionnons les différents types de capteurs de vent et les informations de fonctionnement de ces capteurs.

Chapitre III : Nous avons réalisé plusieurs études théoriques, dont le calcul de la masse volumique et puissance de la turbine des éoliennes.



CHAPITRE I :
Généralités sur les
Energies
Renouvelables

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

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. [1]

I-2. Définition Energie renouvelable :

Les énergies renouvelables (EnR) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : le Soleil essentiellement pour la chaleur et la lumière qu'il génère, mais aussi l'attraction de la Lune (marées) et la chaleur générée par la Terre (géothermie), Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle.

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique, La part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée en 2018 à 17,9 %, dont 6,9 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc..) et 11,0 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,3 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire), 3,6 % d'hydroélectricité, 2,1 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire, géothermie, biomasse, biogaz) et 1 % pour les biocarburants ; leur part dans la production d'électricité était estimée en 2018 à 26,4 %.[2]

I-3. Historique :

L'utilisation des énergies renouvelables a prédominé jusqu'à la révolution industrielle au 18ème siècle, Elles ont commencé à être substituées par le charbon puis par l'exploitation intensive du pétrole

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

et du gaz à partir du début du 19^{ème} siècle, Cette tendance s'est poursuivie au 20^{ème} siècle avec l'utilisation accrue des énergies fossiles et l'avènement du nucléaire. [3]

Après le premier choc pétrolier en 1973, certains pays industrialisés ont commencé à s'intéresser à nouveau aux énergies renouvelables, mais elles étaient très vite oubliées à cause de l'effondrement des prix des cours des énergies fossiles dans les années 80, Mais le malheureux accident de Tchernobyl, à la fin des années 80 a été la cause de la ré-exploitation à nouveau des sources renouvelables.

I-4. Différents types de l'énergie renouvelable :

Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée, Leur exploitation et un moyen de répondre aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement, Les principales formes d'énergie renouvelables (énergie solaire, Énergie éolienne, énergie issue de la biomasse, énergie géothermique, énergie hydraulique,) [4]

I-4-1. Energie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur, Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour).

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques Indirectement, l'énergie solaire est aussi la source de la plupart des énergies renouvelables et des hydrocarbures fossiles, Elle est en effet responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergies marines) et d'air (énergie éolienne), du cycle de l'eau (énergie hydraulique) et de la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures). [5]



Figure I-1 : Energie solaire [5]

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

I-4-1-1. Energie solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à produire de la chaleur à partir des rayons du soleil et à utiliser celle-ci directement, Il s'agit de dispositifs opérant à basse température (moins de 100 °C) pour les usages de l'habitat et du secteur tertiaire (eau chaude sanitaire et chauffage) et pour les divers besoins de l'industrie, C'est aujourd'hui la part prépondérante du solaire dans le monde.

On utilise des capteurs thermiques, destinés à absorber la chaleur solaire et à la restituer à un fluide caloporteur qui circule vers les lieux d'utilisation.

Différents types de capteurs vont des plus simples pour les usages domestiques aux plus sophistiqués pour les installations industrielle, Dans les utilisations les plus courantes, il s'agit de capteurs plans, composés d'un corps noir absorbant le rayonnement solaire, d'un isolant thermique et d'une vitre assurant l'effet de serre. [6]

a. Principes de fonctionnement solaire thermique :

La figure I-2 ci-dessous utilisant mode de fonctionnement d'un CESI (Chauffe Eau Solaire Individuel), fonctionnant à l'énergie solaire thermique.

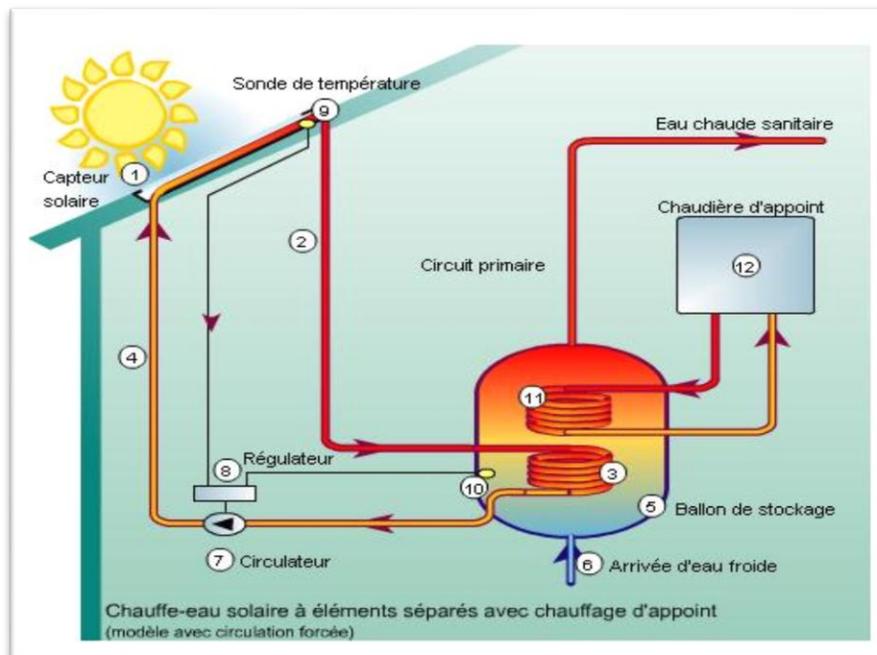


Figure I-2 : Principes de fonctionnement solaire thermique [6]

Un chauffe-eau solaire individuel (CESI) a pour but de fournir de l'eau chaude sanitaire pour différents usages : sanitaire, appoint chauffage, piscine, à partir uniquement de l'énergie solaire. Il peut compléter, voire même se substituer totalement au mode de chauffage d'eau classique.

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

b. Types de capteurs thermiques :

1. Les capteurs plans vitrés :

Le type de capteur le plus utilisé est le capteur plan vitré. Il comprend un coffre isolant sur lequel est fixée une vitre, A l'intérieur sont disposés des absorbeurs noirs destinés à capter l'énergie solaire. Un liquide caloporteur circulant dans des tuyauteries en con, Tact avec l'absorbeur capte l'énergie solaire.

La vitre située sur la face avant et l'isolant permettent de réduire les déperditions de chaleur. L'absorbeur peut être recouvert d'un revêtement sélectif qu'imite le rayonnement vers l'extérieur et améliore ses performances, Ce type de capteur est bien adapté à la production de l'eau chaude sanitaire et au chauffage des bâtiments en métropole (températures d'eau chaude généralement comprises entre 30 et 60°C). [8]

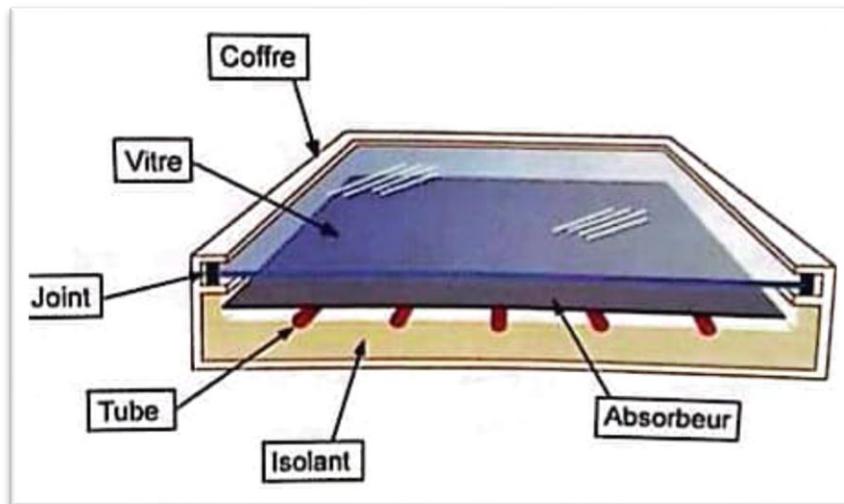


Figure I-3 : capteurs plans vitrés [8]

2. Les capteurs tubes vitrés sous vide :

Plastique et s'utilise notamment dans les applications requérant des températures peu élevées (par exemple le chauffage de l'eau des ce capteur génère de fortes pertes thermiques, Il est en matière températures peu élevées (par exemple le chauffage de l'eau d piscines), Les déperditions thermiques sont réduites par rapport aux capteurs plans grâce à une excellente isolation thermique (on fait le vide dans ces tubes). [8]

3. Les capteurs hybrides :

Les capteurs hybrides combinent la production d'eau chaude et d'électricité en même temps, Ces capteurs sont principalement utilisés pour les besoins des pompes à chaleur, Parce qu'ils peuvent

CHAPITRE I Généralités sur les Energies Renouvelable

générer la chaleur et l'électricité nécessaires au fonctionnement d'une pompe à chaleur ou régénérer l'énergie des détecteurs géothermiques d'une pompe à chaleur

I-4-1-2. Solaire thermodynamique :

Le solaire thermodynamique ou CSP (Concentrated Solaire Power) désigne l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur pour la convertir en énergie électrique, au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique (une turbine et un générateur, par exemple).

Le solaire thermodynamique est principalement destinée aux pays à fort ensoleillement et permet, contrairement aux centrales photovoltaïques, de lisser plus facilement la production grâce à un stockage thermique tampon moins onéreux que les systèmes de batterie. [9]

a. Principe de la solaire thermodynamique :

Le principe est basé sur la concentration du rayonnement solaire direct à l'aide de miroirs, dont la chaleur transmise actionne des turbines génératrices d'électricité (voir les schémas dans les pages suivantes), L'immense intérêt du solaire à concentration réside en sa capacité à délivrer de l'électricité par centaines de méga watt, au moyen d'installations de dimensions industrielles, Lesquelles peuvent couvrir des dizaines et, même, des centaines d'hectares. Son seul inconvénient, la surface nécessaire pour obtenir les performances voulues. [10]



Figure I-4 : principe de la solaire thermodynamique [10]

b. Les types de centrales solaires thermodynamiques à concentration :

Il existe quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques, Toutes comportent un dispositif de concentration des rayons du soleil, Il peut être soit linéaire soit par foyer.

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

1. Centrales à miroirs cylindra-paraboliques (linéaire) :

Installées dans le désert, ces centrales sont aujourd'hui les plus répandues dans le monde. L'Espagne abrite d'ailleurs une des structures les plus puissantes d'Europe : Andosol, Ce type de centrale se caractérise par plusieurs alignements de miroirs incurvés où passe au centre le fluide caloporteur.

2. Centrales solaires à miroirs de Fresnel (linéaire) :

Relativement peu utilisées, ces centrales ont l'avantage d'être moins onéreuses que celles à miroirs incurvés. Cette baisse du coût vient du fait que les miroirs de Fresnel ne sont que très légèrement courbés, donc moins chers à réaliser, La captation du rayonnement solaire se fait grâce à un système faisant bouger uniquement les miroirs.



Figure I-5 : Centrales solaires à miroirs de Fresnel [10]

3. Centrales à tour (par foyer) :

Les centrales à tour sont composées d'un champ d'héliostats et d'une haute tour, Cette dernière a, à son sommet, un récepteur où circule le fluide caloporteur. Il est directement chauffé par les centaines de miroirs des héliostats disposés concentriquement autour de la tour, Ce dispositif est particulièrement performant, notamment grâce à une perte thermique réduite puisque le fluide est transféré à un cycle à vapeur.



Figure I-6 : Centrales à tour [10]

4. Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling :

Le célèbre Grand Four Solaire d'Oreillon est un exemple de centrale à miroir parabolique Dish-Stirling, Son fonctionnement ? Une parabole orientable recouverte de miroirs qui réfléchissent le rayonnement du soleil en un point de convergence. Sur ce point se trouve un moteur Stirling, Le moteur monte alors en température, ce qui chauffe le gaz contenu et actionne un piston, l'énergie thermique est ainsi transformée en énergie mécanique avant d'être une nouvelle fois transformée en énergie électrique via un générateur. [11]



Figure I-7 : Centrale à miroir parabolique [11]

I-4-1-3.Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques, Elle résulte de la conversion directe dans un semi – conducteur d'un photon en électron.

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

Outre les avantages liés aux faibles coûts de maintenance des systèmes photovoltaïques, cette énergie répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est très onéreux, l'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante, modulaire ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. [12]

a. Principe de fonctionnement :

La cellule Photovoltaïque, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque, il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique (diodes, transistors et circuits intégrés), l'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent), Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque.

Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [13]

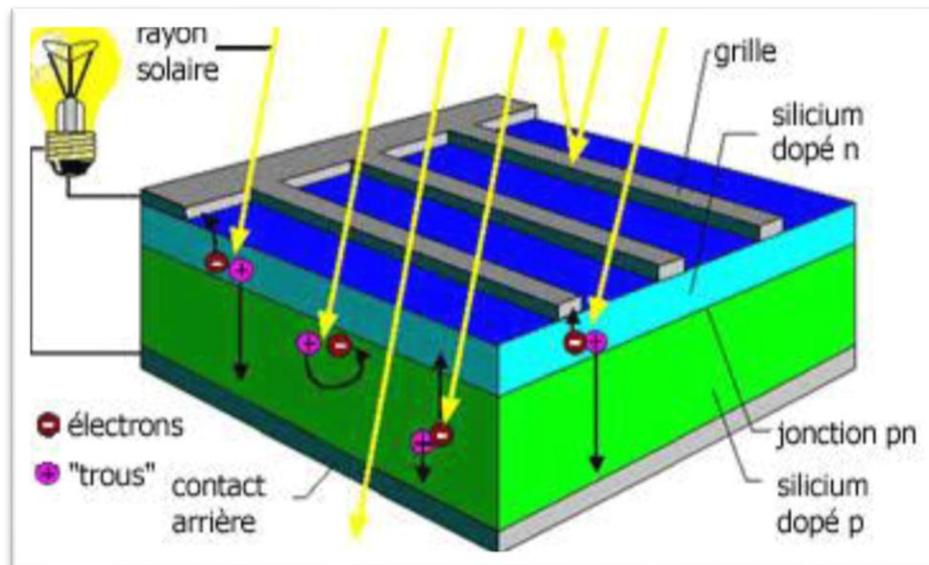


Figure I-8 : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [13]

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

b. Les types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :

1. Les cellules monocristallines : Elles ont le meilleur rendement (de 13 à 17% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire), Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.

2. Les cellules poly cristallines : Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important, Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

3. Les cellules amorphes : Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé, Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres, L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclaircissement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). [14]

I-4-1-4. Avantages et inconvénient:

Les avantages

- Deux types d'énergies à capter : photovoltaïque et chaleur
- Une énergie inépuisable à l'échelle humaine (fin du soleil prévue dans plus de 5 milliards d'années !)
- Pas de pollution dans la production directe d'énergie
- Facile à mettre en place chez un particulier
- Peu chère à exploiter après l'installation des équipements
- Permet de devenir autonome en énergie de manière simple
- Peu de nuisances visuelles, et aucune nuisance sonore. [15]

Les inconvénients

Malgré tous ses avantages, l'énergie solaire est comme toutes les énergies, une affaire de compromis.

Elle a donc, elle aussi, quelques inconvénients, Voici les principaux :

- L'énergie solaire reste dépendante... du soleil ! Pas de soleil, pas d'électricité, ni de chaleur. Il reste donc souvent indispensable d'avoir une autre source d'énergie ou de chaleur.
- Les coûts d'installation restent élevés pour les particuliers
- Les installations photovoltaïques ont un cycle de vie limité et un rendement décroissant avec le temps
- Il n'est pas possible de stocker l'électricité produite par l'énergie photovoltaïque (mais celle non utilisée peut être revendue aux fournisseurs d'énergie comme Enedis)

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

- L'énergie solaire thermique nécessite des ajustements dans un logis pour être conservée.
- A l'heure actuelle, les installations usagées ne sont pas toutes recyclées, et les nouvelles demandent elles-aussi de l'énergie (pas toujours propre) pour être produites. [15]

I-4-2.Energie biomasses:

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre, Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse, différents types sont à considérer : le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz, Le bois-énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde, Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage.

L'énergie peut être stockée et émet peu de gaz à effet de serre, Cependant, la biomasse en peut avoir qu'un apport limité, en raison de ses impacts négatifs sur l'environnement, L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement, La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale.

La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante, Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré, Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution, Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur, L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir [16], De figure(1,9) énergie biomasse

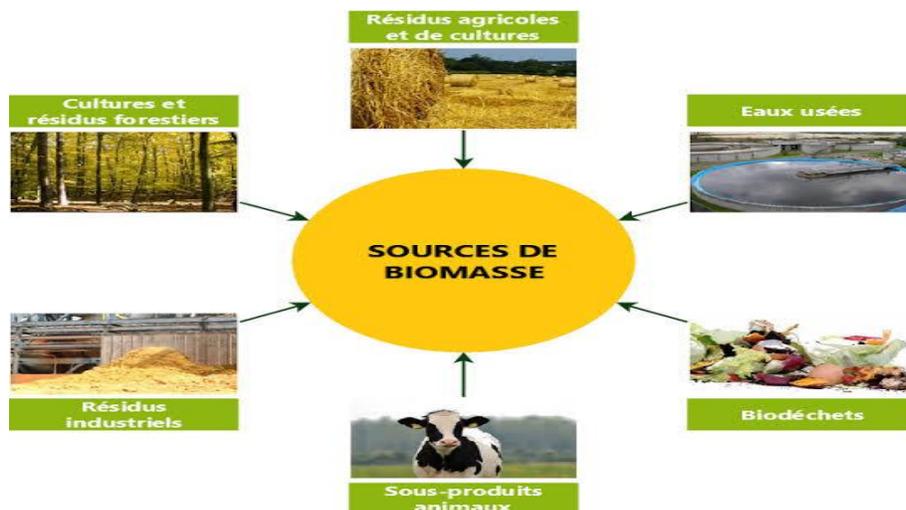


Figure I-9 : Energie biomasses [16]

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

I-4-2-1.Principales catégories d'énergies relatives à la biomasse :

- **Bio fuel:** la combustion naturelle du bois, de la paille ou des récoltes avec un fort pouvoir calorifique
- **Incineration des déchets:** soit des déchets domestiques, ou des déchets commerciaux, c'est une méthode d'éliminer les déchets, Elle est utilisée pour le chauffage ou pour la production d'énergie électrique, Deux tonnes de déchets ménagers peuvent contenir autant d'énergie qu'une tonne de charbon.
- **Biogaz:** la dégradation des déchets émet de grandes quantités de méthane qui est un gaz combustible, additionnées à une faible quantité d'oxygène, peut agir en tant que source d'énergie. [17]

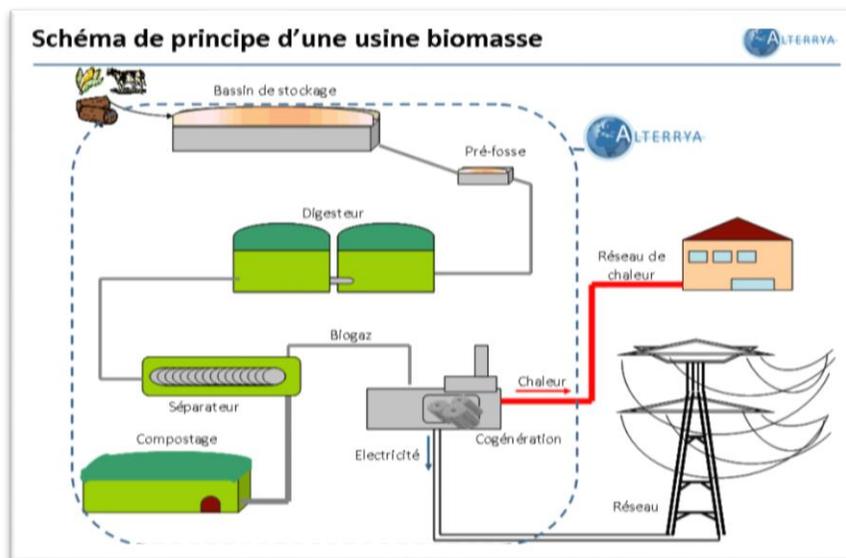


Figure I-10 : usine biomasse [17]

I-4-2-3.Types de biomasse :

a. Biomasse sèche : le bois de feu est la plus ancienne source d'énergie, Les divers déchets ligneux constituent la biomasse sèche et sont également appelés « bois énergie ».

b. Biomasse humide : les déchets organiques d'origine agricole (fumiers, lisiers..), agroalimentaire ou urbaine (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères...) constituent la biomasse « humide », qui peut être transformée en énergie ou en engrais/amendement

c. La production de biocarburant : enfin, se concentre principalement autour de trois filières dites de première génération : la filière huile qui utilise directement les huiles végétales, brutes ou transformées en diester pour alimenter les moteurs diesels, la filière alcool qui transforme par fermentation les

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

sucres des végétaux en alcool qui peut être ensuite transformé en additif pour carburant, et la filière gaz, qui convertit biogaz et singez en hydrocarbures liquides, des biocarburants de deuxième et troisième génération commencent également à se développer sur le marché de la biomasse, en étant produits à partir de résidus non alimentaires de plantes (paille, algues) et d'huile à base de micro algues. [18]

I-4-2-4. Avantages et inconvénients:

Les avantages :

Différents auteurs ont révélé que les biomasses présentent certains avantages suivants [19] :

- Une très grande porosité, la surface spécifique peut atteindre 256 m² par gramme
- Présentent une haute capacité de rétention pour les métaux contenus en trace dans les eaux; (ex : 570% et 690% pour le cobalt et le nickel ;
- Peuvent être utilisés à des températures de 30 à 45 °C et un pH de 2 à 8 avec une légère variation de rétention ;
- Le métal retenu par la biomasse peut être récupéré par désorption ;
- La biomasse peut être réutilisée après régénération ;
- Présentent des bonnes caractéristiques de manutention, elles peuvent être utilisées dans différents cas de configurations de réacteurs (réacteur agité, lits fixes ou autres) ;
- Moins chères et relativement simple à préparer

Les inconvénients:

- Leur rendement énergétique est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Provoque la pollution des eaux et des sols.

Les couts et les impacts du transport pour amener le bois là ou la ressource manque.

I-4-3. Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre, Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins.

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo haline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité).

Attestés dès l'Antiquité, les moulins à eau ont exploité cette énergie pour pomper l'eau, moudre le grain ou encore actionner des marteaux-pilons, Leurs héritières modernes, les centrales hydroélectriques, fournissent une électricité renouvelable en produisant peu de gaz à effet de serre (sauf dans le cas des régions tropicales, où la dégradation de matière organique produirait du méthane), L'exploitation de l'énergie hydraulique a toutefois certains inconvénients, notamment en matière de continuité des cours d'eau. En effet, la création d'un barrage représente un obstacle pour la navigation, la migration des espèces aquatiques et le transfert de sédiments. La figure (I-11) montre de fonctionnement d'une centrale hydraulique. [20]



Figure I-11 : Energie hydraulique [20]

I-4-3-1.Principe de Fonctionnement d'énergie hydraulique :

Le principe de fonctionnement de l'énergie hydraulique l'énergie hydraulique renouvelable est produite dans des centrales hydrauliques, de très gros moulins, qui captent l'énergie cinétique de l'eau, son courant naturel, ou sa puissance lors des chutes d'eau répétées comme c'est le cas dans les reliefs montagneux, pour faire tourner de grandes turbines, Ces dernières entraîneront avec elles des générateurs électriques qui produiront de l'électricité qui pourra être injectée sur le réseau. [21]

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

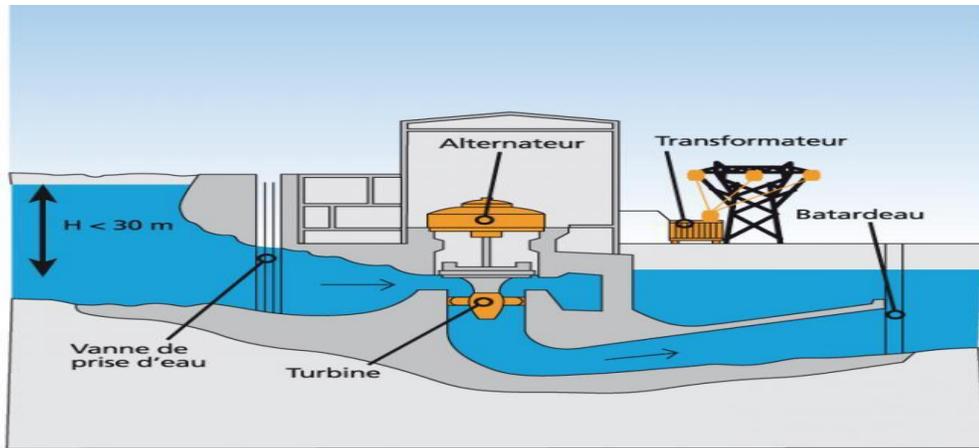


Figure I-12 : Principe de fonctionnement d'énergie hydraulique [21]

I-4-3-2. Les types de l'énergie hydraulique :

a. **Energie marémotrice** : issue du mouvement de l'eau créé par les marées (Variations du niveau de la mer, courants de marée).

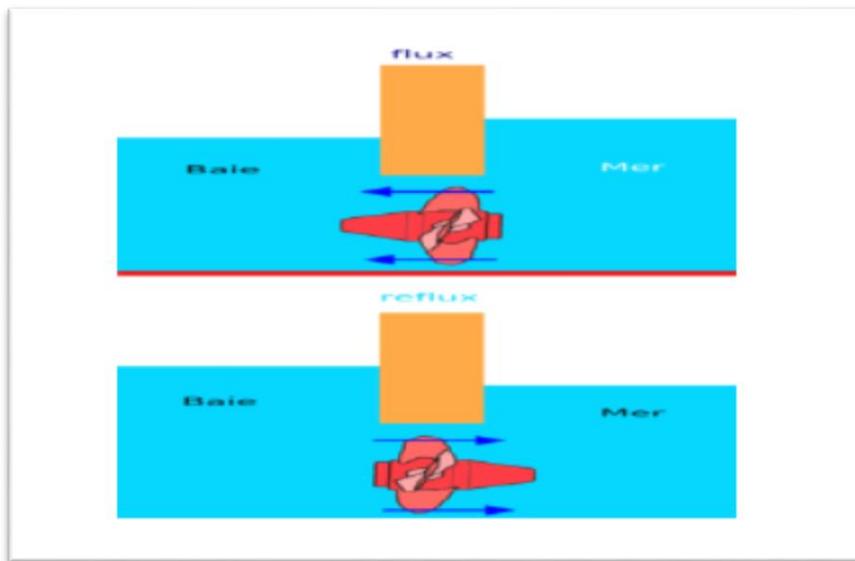


Figure I-13 : Energie Marémotrice [21]

b. **Energie hydrolienne** : les hydroliennes utilisent les courants sous-marins,

Energie thermique des mers : produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.

CHAPITRE I Généralités sur les Energies Renouvelable

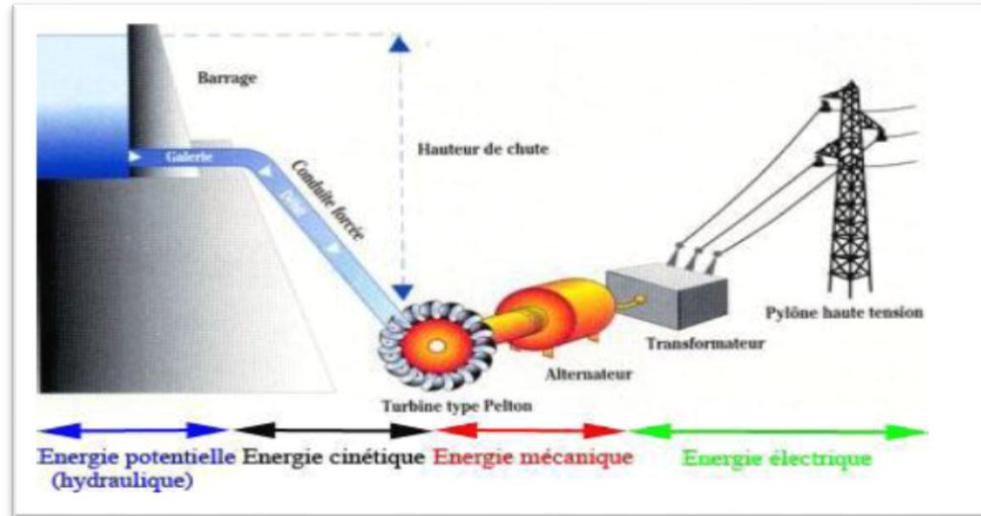


Figure I-14 : Barrage Hydraulique [21]

c. Energie des vagues : utilise la puissance du mouvement des vagues.

d. Energie osmotique : la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer est source d'énergie [22].

I-4-3-3. Avantages et inconvénients :

Les avantages :

- L'hydroélectricité est issue d'une source d'énergie verte
- L'énergie hydraulique n'émet de gaz à effet de serre, elle préserve donc la planète du réchauffement climatique
- Elle ne produit pas de déchets – contrairement à l'énergie nucléaire qui en produit un certain nombre à hauts potentiels toxiques
- L'énergie hydraulique permet de réguler les pics de consommation d'électricité survenant en hiver par exemple, grâce à ses réservoirs de stockage et de pallier ainsi à des coupures de réseau intempestives
- L'énergie verte est de plus accessible à un coût abordable sur le moyen-long terme
- Les centrales hydroélectriques participent au développement économique et touristique des zones d'habitations où elles sont implantées [23]

Les inconvénients:

- L'énergie hydraulique suppose la construction d'installations de barrages avec un fort impact sur les écosystèmes environnants. La faune et la flore de ces cours d'eau sont directement

CHAPITRE I Généralités sur les Energies Renouvelable

impactés par la construction d'une retenue d'eau artificielle – avec la disparition de certaines espèces animales

- Idem pour la construction de réseaux de lignes électriques qui donnent lieu généralement à d'autres constructions telles que des routes et l'installation de poteaux
- La construction des infrastructures hydrauliques prend de la place et est souvent à l'origine de déplacements de populations
- Les zones d'exploitation de l'énergie hydraulique sont limitées à des endroits montagneux. Or, la plupart de ces zones sont déjà exploitées et dotées de centrales de lacs. Cette limitation réduit le développement de cette énergie renouvelable et de fait l'augmentation de sa part dans le mix énergétique français. Problématique, lorsqu'on sait les intentions du gouvernement de réduire la production d'électricité issue du parc nucléaire de 50% d'ici 2050 et le recours aux énergies fossiles de 30% d'ici 2030
- La production hydroélectrique demande de lourds investissements de capitaux
- L'énergie hydraulique est soumise aux aléas climatiques et peut représenter une source de production d'énergie électrique instable. En cas de sécheresse, les cours d'eau se réduisent et de fait sa force motrice de l'eau également. [23]

I-4-4.Énergie géothermique:

L'énergie géothermique est une puissance développée par l'exploitation de la chaleur sous la surface de la terre. Des puits sont utilisés pour transporter la vapeur et l'eau chaude dans les profondeurs de la terre, jusqu'à la surface. L'eau chaude est alors utilisée pour faire tourner les turbines et pour produire de l'électricité, Les zones du sous-sol imprégnées d'eau sont appelées des aquifères. Leur température varie d'une dizaine de degrés selon la profondeur et la région, Les utilisations de la géothermie sont fonction du niveau de la température de l'eau géothermale :

- Une ressource de 20 ou 30°C suffit au chauffage des serres ou des bassins de pisciculture.
- Une ressource entre 45 et 75°C est nécessaire pour le chauffage des bâtiments.
- La production d'électricité est envisageable à partir de 100 à 150°C.

L'exploitation de l'énergie géothermique exige l'existence simultanée d'une ressource en sous sol et d'un besoin en surface car la chaleur n'est pas économiquement transportable à longue distance ? [24]



Figure I-15 : Energie géothermique [24]

I-4-4-1.Principe de fonctionnement de la géothermie :

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité, Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté, En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau).

Selon les régions, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, Ce gradient géothermique varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C, La plus grande partie de la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. [25]

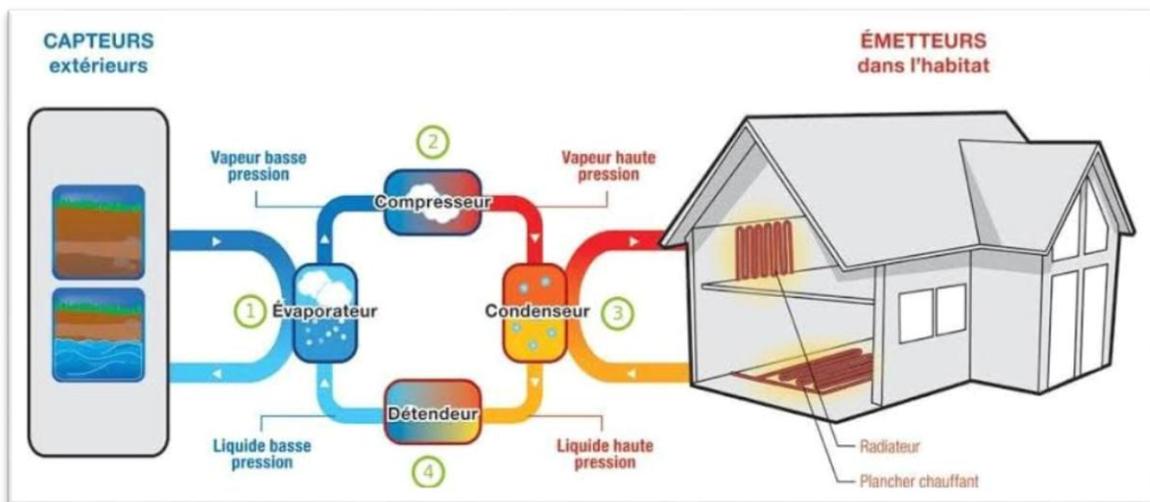


Figure I-16 : Principe de la géothermie [25]

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

I-4-4-2.Types d'énergie géothermique en fonction de la température de l'eau expulsée :

a. **Énergie géothermique de haute température** : entre 150 et 400°. Sur la superficie terrestre elle se convertit en vapeur et au travers d'une turbine elle génère de l'électricité.

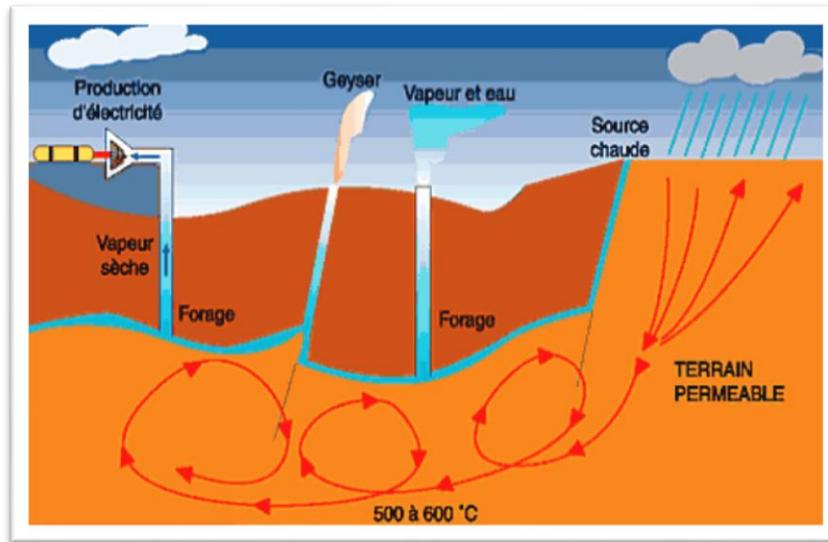


Figure I-17 : Géothermie de haute température [26]

b. **Énergie géothermique de basse température**: entre 50 et 70°, utilisée principalement pour les besoins domestiques comme le chauffage et, ponctuellement, dans les serres ou l'agriculture

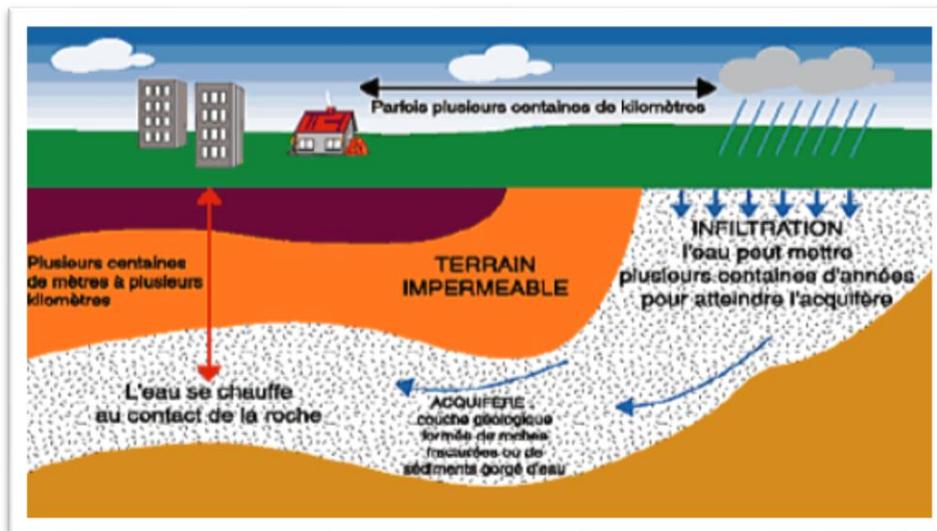


Figure I-18 : Géothermie basse température [26]

c. **Énergie géothermique de température moyen** : entre 70 et 150°, exploitée par des petites centrales électriques.

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

d. **Énergie géothermique de très faible température** : entre 20 et 50°, Comme ce n'est pas suffisant pour la climatisation, il faut utiliser des pompes de chaleur géothermiques qui permettent aussi bien de chauffer que de réfrigérer. [26]

I-4-4-3. Avantages et inconvénient:

Avantages

- Il s'agit d'une ressource renouvelable, tant que son taux d'extraction est inférieur au taux naturel de recharge.
- Elle est considérée comme une énergie "propre", car elle réduit la consommation de combustibles fossiles et d'autres ressources non renouvelables.
- Il ne produit pratiquement aucun déchet, ce qui réduit considérablement son impact sur l'environnement.
- L'émission de CO₂ à effet de serre est beaucoup plus faible que celle produite par la combustion pour obtenir la même énergie, elle ne contribue donc guère au réchauffement de la planète.
- Elle représente une économie puisque ses coûts de production d'électricité sont faibles.
- Il fournit une grande quantité de ressources ; on pense qu'aujourd'hui il peut fournir plus d'énergie que tous les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon et uranium) réunis [26]

Inconvénients

- Des fuites peuvent se produire, entraînant la formation de sulfure d'hydrogène (qui, à forte dose, est mortel pour l'homme), d'arsenic, d'ammoniac ou d'autres substances susceptibles de contaminer le sol et les eaux avoisinantes.
- Les centrales géothermiques doivent être installées dans des endroits où la chaleur du sous-sol est élevée.
- Cette énergie n'est pas transportable et doit être utilisée sur place, c'est-à-dire à l'endroit même où elle est produite (approvisionnement local).
- Elles ont un impact sur le paysage, puisque la construction d'installations destinées à extraire la chaleur des roches souterraines et du magma nécessite des modifications du terrain.

CHAPITER I Généralités sur les Energies Renouvelable

- De petits tremblements de terre se produisent dans les zones proches des centrales géothermiques en raison du refroidissement et de la rupture soudaine des roches de la croûte terrestre.
- La pollution thermique.
- La pollution acoustique. Dans les phases initiales où il est nécessaire de forer des puits, on atteint jusqu'à 115 décibels (presque le bruit généré par le moteur d'un avion), bien qu'une fois que c'est fait, son fonctionnement normal ne produit pratiquement aucun bruit extérieur (il se situe entre 75 et 80 décibels, le bruit d'un aspirateur). [26]

I-4-5.Énergie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. I.19). [27]



Figure I-19 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [27]

I-4-6.Conclusion :

Les énergies renouvelables représentent une grande partie de notre avenir énergétique, Elles permettent le développement futur et sont une solution de nos problèmes énergétiques et environnementaux.

Il y a plusieurs énergies renouvelables qui existent mais sont peu utilisées par l'Homme car elles ont un coût élevé. Leur création est dû aux changements climatiques et à la pollution et aux gaz échappés des industries. Elles ont des avantages propres à elles: elles sont inépuisables, respectueuses de l'environnement (aucun déchets rejetés dans la nature) comparées aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole.

Elles aident aussi à lutter contre l'effet de serre et la pollution atmosphérique. Elles sont aussi source d'emplois. Un argument permet de parler plus des énergies renouvelables, c'est l'épuisement des énergies fossiles (charbon, pétrole,...)



CHAPITRE II :
Etude sur les
éoliennes

II-1. Introduction :

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, Car énergies, on trouve l'énergie éolienne.

Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles.

L'énergie éolienne est véhiculée par le vent, celle-ci est due indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur (couramment appelé "éolienne") est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique.

Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants [28].

II-2. Historique :

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre. Le vent fût utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, il présentait presque la seule source d'énergie pour les navires jusqu'à ce que WATT a inventé le moteur à vapeur dans le dix-huitième siècle L'histoire nous apprend qu'au dix-septième siècle A.J.C, l'empereur de Babylone, HAMMURABI, avait conçu un système d'irrigation basé sur l'énergie éolienne.

Trois siècles A.J.C, L'Egyptien HERO d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales pour getter des organes.

Les perses utilisaient en septième siècle des éoliennes rudimentaires à axe vertical qui servait à l'irrigation des terres cultivées et au meulage du grain.

Ce type de moulins à vent va se répandre dans le monde arabe, Par la suite, les croisées les ramenèrent en Orient, le système éolien est utilisé pour le pompage d'eau, elles servirent par la suite au seizième siècle à d'autres fonctions, tel que couper le bois, Ce n'est qu'en 1890 au Danemark que les éoliennes seront utilisées pour créer de l'énergie électrique. [29]

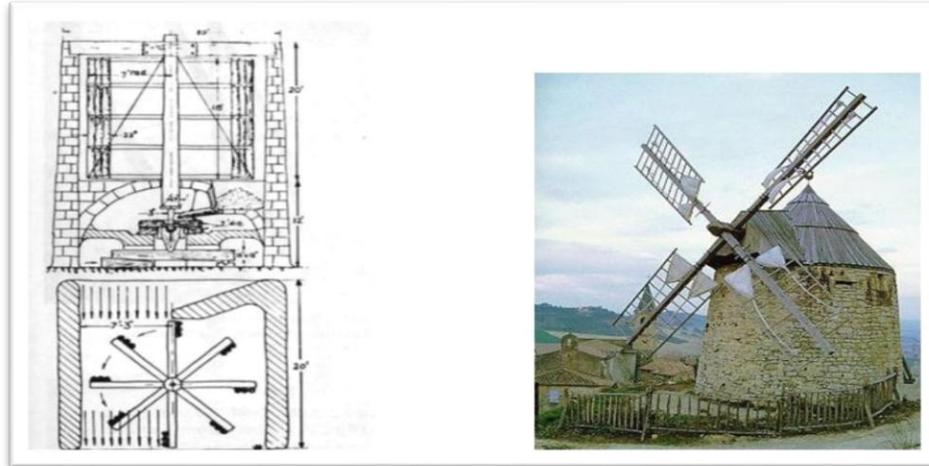


Figure II-1 : Le moulin perse (à gauche) et le moulin à vent (à droite) [29]

II-3. Définitions du vent :

Les vents sont généralement classés selon leur force et la direction dans laquelle ils soufflent, Il existe plusieurs grades de classification des vents dont les plus connus sont le grade Beaufort et le grade fujita.

La première classe les vents soutenus en 13 catégories allant de légers à ouragan, coup de vent et tempête. La seconde catégorise la force du vent en tornades, Les pics de vent avec des vents supérieurs à la moyenne sont appelés rafales, Les vents forts associés aux orages sont appelés tempêtes descendantes et, en mer, ils sont appelés grains, Les vents forts sont associés à de nombreux autres phénomènes météorologiques, tels que les cyclones tropicaux, les tempêtes et les tornades. [30]

II-4.Origine du vent :

Les causes principales des grands flux de circulation atmosphérique sont : la différence de température entre l'équateur et les pôles, qui provoquent une différence de pression, et la rotation de la Terre qui dévie le flot d'air qui s'établit entre ces régions, Des différences locales de pression et de températures vont quant à elle donner des circulations particulières comme les brises de mer ou les tornades sous les orages. [30]

II-4-1.Effets des montagnes :

Les montagnes ont différents effets sur les vents. Le premier est l'onde orographique lorsque le vent soufflant perpendiculairement à une barrière montagneuse doit remonter la pente, Si l'environnement est stable, la masse d'air redescendra du côté aval de l'obstacle et entrera-en oscillation autour d'une

hauteur qui peut être largement supérieure au sommet de celui-ci, Par contre, si l'air est instable, l'air continuera de s'élever, avec ou sans oscillation

L'air froid plus dense en haut d'une montagne y crée une pression plus forte que dans la vallée et provoque un autre effet, Le gradient de pression fait alors dévaler la pente à l'air sur une distance insuffisante pour que la force de Coriolis le dévie, Ce la engendre donc un catabatiqu,On rencontre ce genre d'effet le plus souvent la nuit, Ils sont également très communs au front d'un glacier, par exemple, sur la côte du Groenland et de l'Antarctique à toute heure. [31]

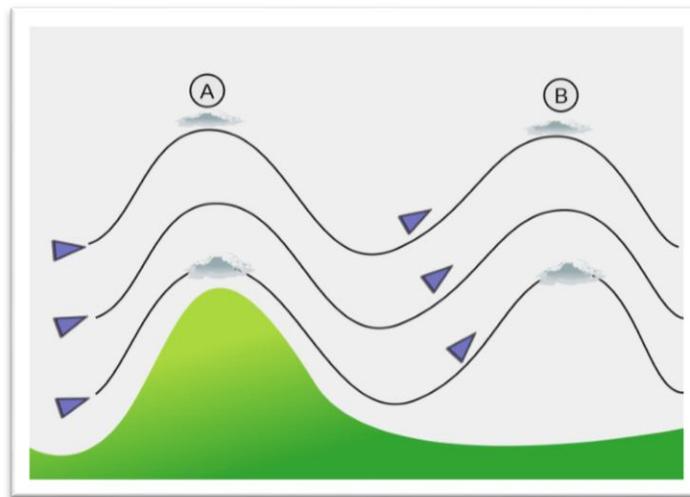


Figure II-2: Effet d'ondulation avec amortissement sur un vent à cause d'une montagne. [31]

II-4-2.Effets de la végétation et de la rugosité du paysage :

La rugosité du paysage et en particulier la rugosité « molle » (celle des forêts, bocages, savanes, par rapport aux roches et immeubles qui ne bougent pas) des arbres a un impact sur les vents et les turbulences, et indirectement sur les envols ou dépôts de poussières, la température, l'évaporation, le mélange de la partie basse de la colonne d'air (de la hauteur des pots d'échappement à la hauteur où sont émis les panaches de cheminées d'usines ou de chaudières urbaines par exemple), la régularité du vent (important pour les installations d'éoliennes ou de fermes éoliennes), etc.[32]

II-4-3.Brisés de terre :

Durant le jour, près des côtes d'un lac ou de la mer, le soleil réchauffe plus rapidement le sol que l'eau. L'air prend donc plus d'expansion sur terre et s'élève, créant une pression plus basse que sur le plan d'eau.

Une fois encore cette différence de pression se crée sur une distance très faible et ne peut être contrebalancée par les forces de Coriolis, Une brise de mer (lac) s'établit donc, La même chose se produit la nuit mais en direction inverse, la brise de terre [33] [34].

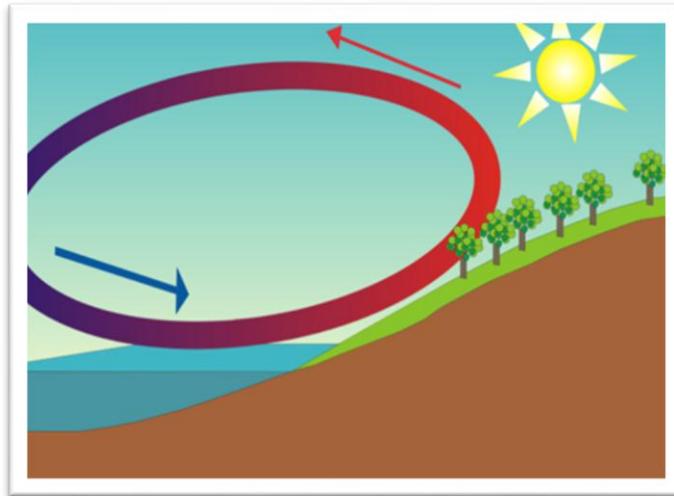


Figure II-3 : Brise de terre (bas) [34]

II-4-4. brises de mer :

On observe des différences de pressions jusqu'à deux millibars et proportionnelles aux masses de terre et d'eau en présence. Cette brise peut résister à un autre vent jusque de l'ordre de 15 km/h (8 nœuds) ; au-delà, elle est en général annulée, ce qui ne signifiera pas un calme plat mais plutôt un système météo instable, Ceci explique également pourquoi il y a très rarement un calme plat en bord de mer mais aussi des vents plus tourmentés qu'à l'intérieur des terres ou en mer.

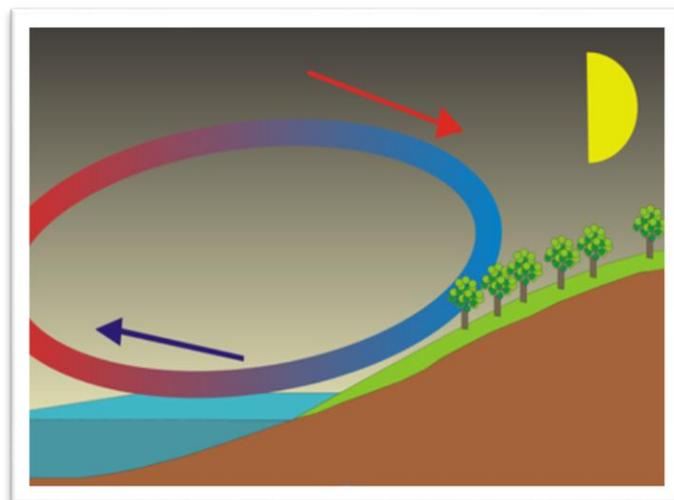


Figure II-4 : Brise de mer (haut) [34]

II-5. Définition des éoliennes :

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en Énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne .

Ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire.

Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit-elle alimente des foyers isolés.[35]

II-6.Principe de l'éolienne :

Les installations utilisant l'énergie éolienne comportent classiquement cinq parties :

- Une turbine éolienne, avec ses annexes mécaniques (régulation, sécurité, réduction) qui, lorsqu'elle est exposée à un vent de vitesse V , tourne à la vitesse Ω et fournit sur son arbre un couple C .
- Un générateur électrique, qui transforme l'énergie éolienne en énergie électrique alternative ou continue.
- Une charge, ou utilisation, qui reçoit cette énergie électrique, Cela peut être une résistance (Chauffage électrique), un moteur, une pompe, ou un réseau de distribution d'énergie électrique. Selon la nature de cette charge, les exigences sur le conditionnement de l'énergie électrique utilisée sont très différentes.
 - Un convertisseur, qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge et qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.
 - Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et éventuellement en régime dynamique.

Toutes les stations destinées à la production d'électricité ont une configuration qui correspond à l'organigramme de la figure II-5 [36]

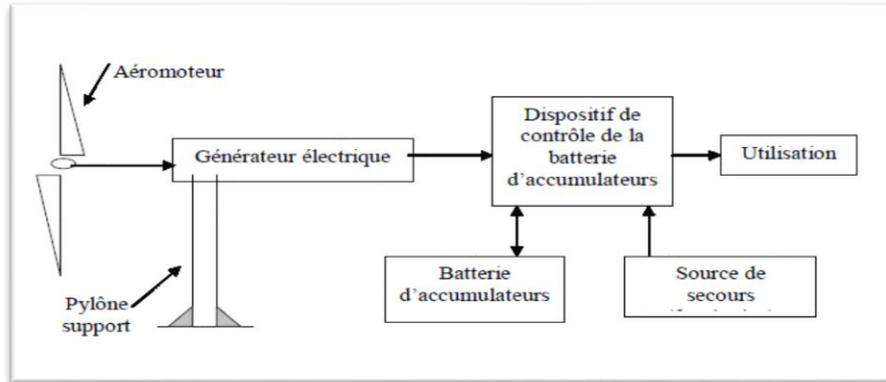


Figure II-5 : Organigramme d'une station d'énergie électrique par aérogénérateur [36]

II-7.Constitution d'une Eolienne :

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor.

L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées. Une éolienne se compose de plusieurs parties. [37]

II-7-1. La fondation :

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



Figure II-6: fondation d'une éolienne [37]

II-7-2.Le mât :

Le mât est plus ou moins imposant selon la force de l'éolienne et est conçu en métal afin d'apporter solidité à l'ensemble, Il supporte les principaux éléments de l'éolienne : la nacelle et le rotor. Certains mâts peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres en hauteur : plus le rotor n'est haut et plus le rendement de

l'éolienne sera bon, les hélices n'étant plus gênées par aucun obstacle, Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.



Figure II-7: un mât d'une éolienne [37]

II-7-3.Le rotor :

Le rotor est composé du nez de l'éolienne et de l'hélice. L'hélice est généralement composée de trois pales, Les pales sont placées au devant de la nacelle et reliées ainsi à elle, Les pales produisent une énergie mécanique qui est transformée en électricité par la nacelle.

L'électricité produite par la nacelle est transportée par des câbles situés dans le mât jusqu'à une cabine de dispersion.

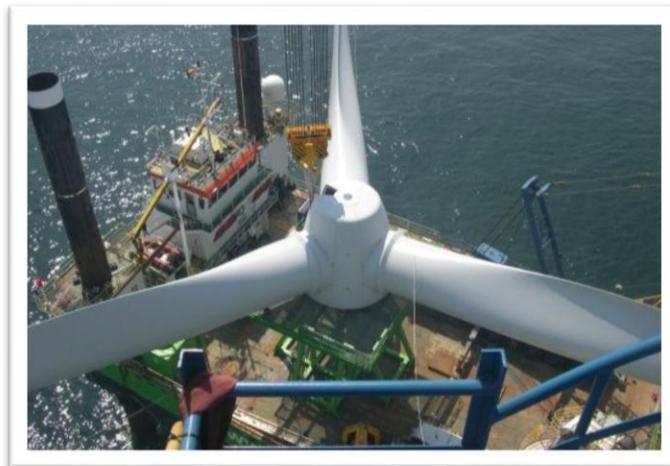


Figure II-8: un rotor d'une éolienne [37]

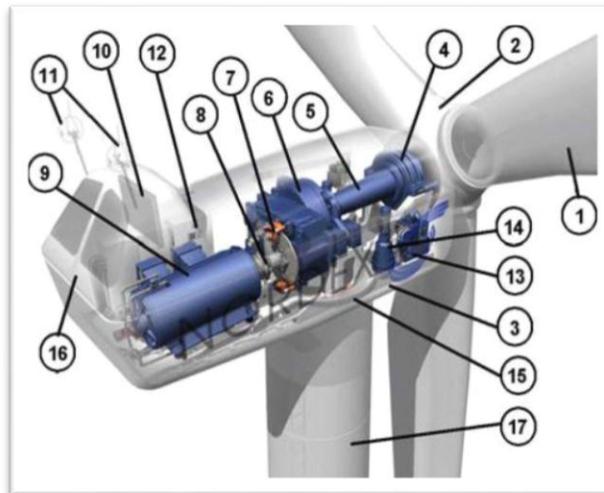
II-7-4.La nacelle :

La nacelle est le moteur de l'éolienne, C'est à l'intérieur de cet équipement que se trouve le générateur d'électricité qui permet de convertir l'énergie produite par le mouvement de l'hélice en

électricité et le reste de la machinerie qui dirige les pales en fonction de la force du vent (frein, suivi du vent, mise au repos) [38].

Et les différents composants d'une nacelle:

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne et de gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation Del 'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile. La nacelle supervise ainsi l'éolienne qui peut être arrêtée dès que le vent n'est pas suffisant ou au contraire trop puissant ou dans tout autre cas qui pourrait poser problème.



- | | | |
|------------------------------|---|--------------------------------------|
| 1: pales. | 7: frein à disque. | 13: centrale hydraulique. |
| 2: moyeu rotor. | 8: accouplement. | 14: mécanisme. |
| 3: nacelle. | 9: génératrice. | 15: paliers du système d'orientation |
| 4: cardan. | 10: radiateur de refroidissement équipés d'un frein à disque. | |
| 5: transmission. | 11: centrale de mesures du vent. | 16: capot. |
| 6: multiplicateur de vitesse | 12: contrôle | 17: mât. |

Figure II-9: Principaux composants d'un aérogénérateur [38].

II-8. Développement de l'énergie éolienne :

La demande croissante en énergie électrique dans le monde le problème du réchauffement climatique et les émissions de gaz à effet de serre sont des facteurs qui ont fait de l'énergie éolienne une source d'énergie alternative et durable.

Le comparant avec d'autres Sources d'énergie, l'énergie éolienne est renouvelable et produit une énergie propre, elle est devenue un moyen trop important dans la production de l'énergie électrique dans plusieurs pays, l'électricité produite par l'énergie éolienne ces dernières années s'est considérablement développée de manière très remarquable.[39]

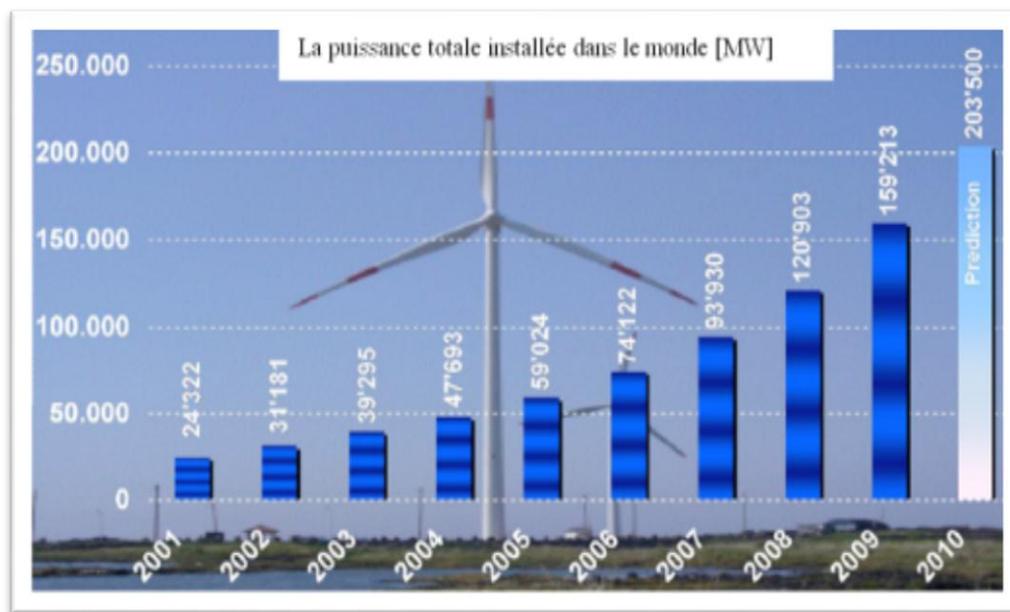


Figure II-10 : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW[39]

II-9.Descriptif d'une éolienne :

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction, En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. 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, il doit être dimensionné précisément en fonction de la machine, des fondations... Plusieurs systèmes existent : haubané, haubané basculant, treillis, autoporteur...

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 10m, 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. L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation...) peut se révéler de bon indicateur du potentiel éolien dans un premier temps. 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.

Cette étape permettra également de réfléchir plus largement à maîtriser ses consommations électriques, Pratiquement, les éoliennes doivent résister à des tempêtes, 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 [40].

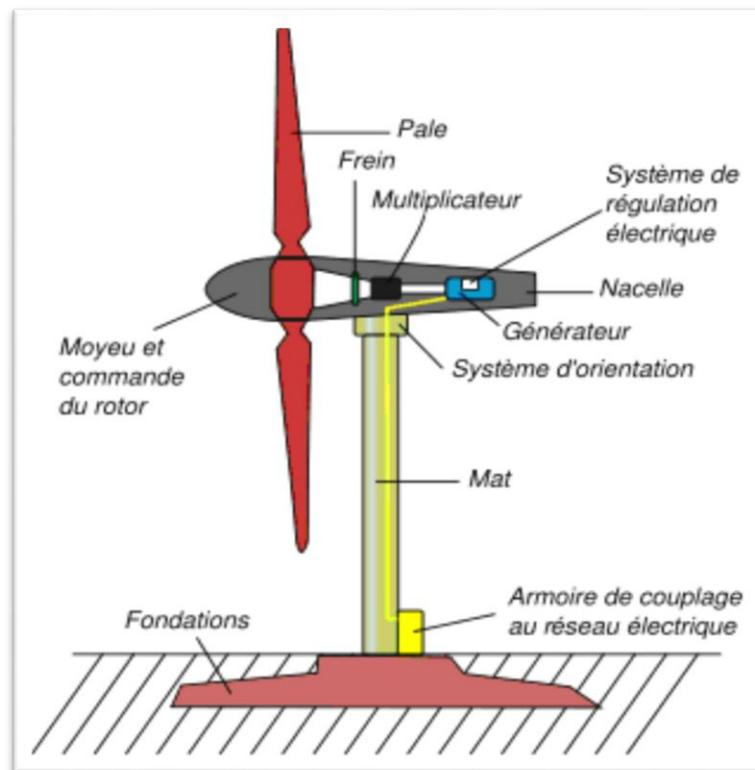


Figure II-11 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur[40]

II-10. Caractéristiques :

Les éoliennes sur terre ou en mer sont en constante évolution, de plus en plus performantes et puissantes, L'apparition de turbines de plus de 4MW pour le terrestre permet d'augmenter l'énergie

produite sans multiplier le nombre d'éoliennes, Avec le développement de l'éolien en mer, les éoliennes en mer posées dépassent désormais les 8MW et les solutions flottantes les 2MW. [41]

II-10-1. Les éoliennes terrestres :

Les éoliennes terrestres tripales à axe horizontal sont les éoliennes les plus implantées sur le territoire.



Figure II-12 : Les éoliennes terrestres [41]

II-10-2. Les éoliennes en mer posées :

Fixes et destinées aux fonds de moins de 50m, ces éoliennes, actuellement les plus puissantes, peuvent exploiter les forts vents marins côtiers.



Figure II-13 : Les éoliennes en mer posées [41]

II-10-3. Les éoliennes en mer flottantes :

Avec une fondation flottante, reliées au fond par des lignes d’ancrage, ces éoliennes peuvent être implantées plus au large, dès 30m de fond.



Figure II-14 : Les éoliennes en mer flottantes [41]

II-11. Classification des éoliennes :

On peut aisément classer les éoliennes en deux grandes familles :

Celles à axe vertical.

Celles à axe horizontal

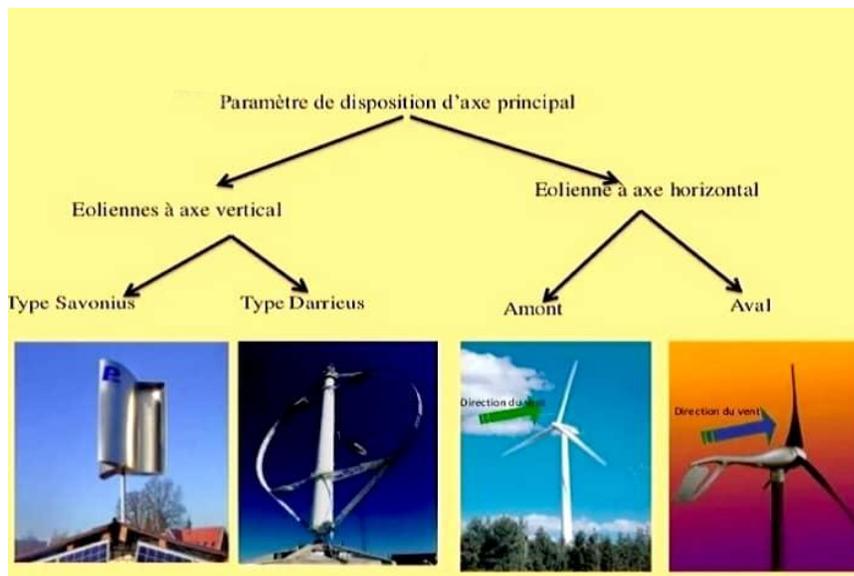


Figure II-15 : Classification des éoliennes [42]

II-11-1. Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches, Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.[42]



Figure II-16:éoliennes à axe vertical [42]

II-11-1-1. Les types d'éoliennes à axe vertical :

a. La traînée différentielle (les éoliennes de Savonius) :

Le rotor desavonius figure (II-17) (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble, L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [43]

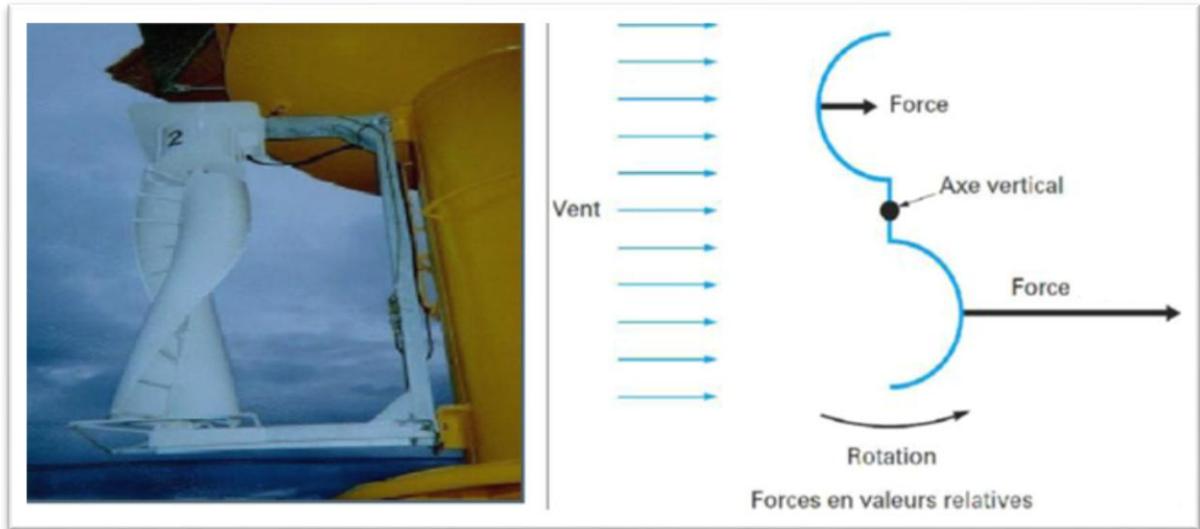


Figure II-17:Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius [43]

b. Variation cyclique d'incidence (les éoliennes de Darrieus) :

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement. De l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce Profil (Figure II-18).

La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif .Le principe de mise en mouvement de ce type d'éolienne est le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, on obtient ainsi un couple moteur. [42]

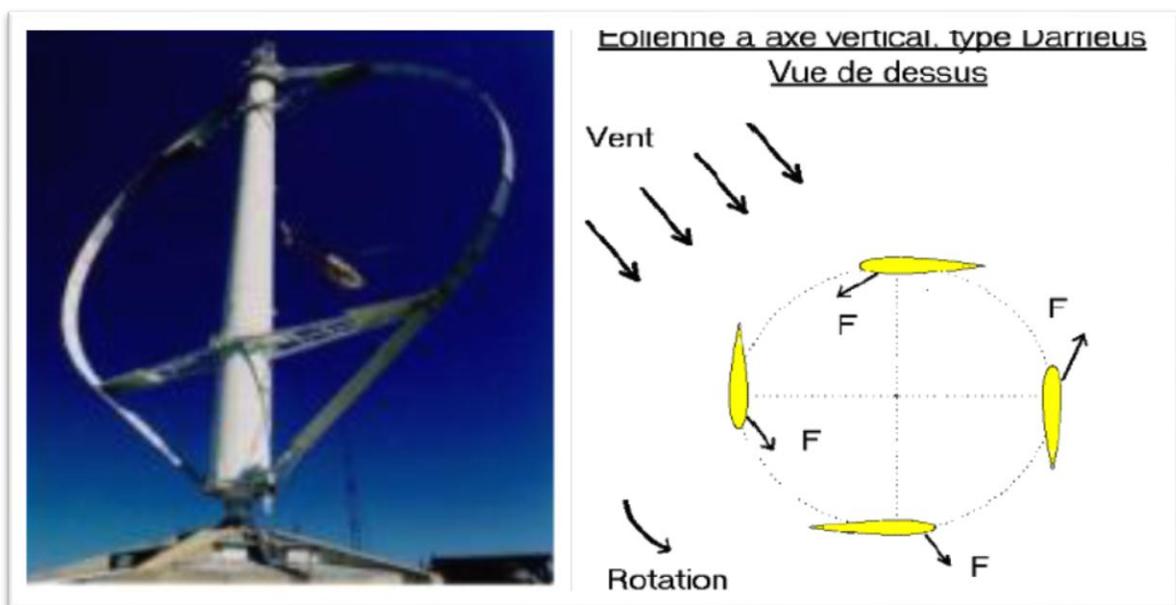


Figure II-18:Schéma de principe du rotor de Darrieus [42]

II-11-1-2. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical :

Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction [44].
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien
- Faible bruit [45]

Inconvénients :

Les inconvénients principaux d'une éolienne à axe vertical sont :

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance [44].
- Faible vitesse du vent à proximité du sol [44].

L'éolienne ne démarre pas automatiquement (Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s) [46]

II-10-2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien, Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [47].

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.



Figure II-19: Eoliennes à axe horizontal [47]

II-11-2-2. Les types d'éoliennes à axe horizontal :

a. Eoliennes lentes :

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m, Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite, Ces éoliennes multi pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse, Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts, Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [48].

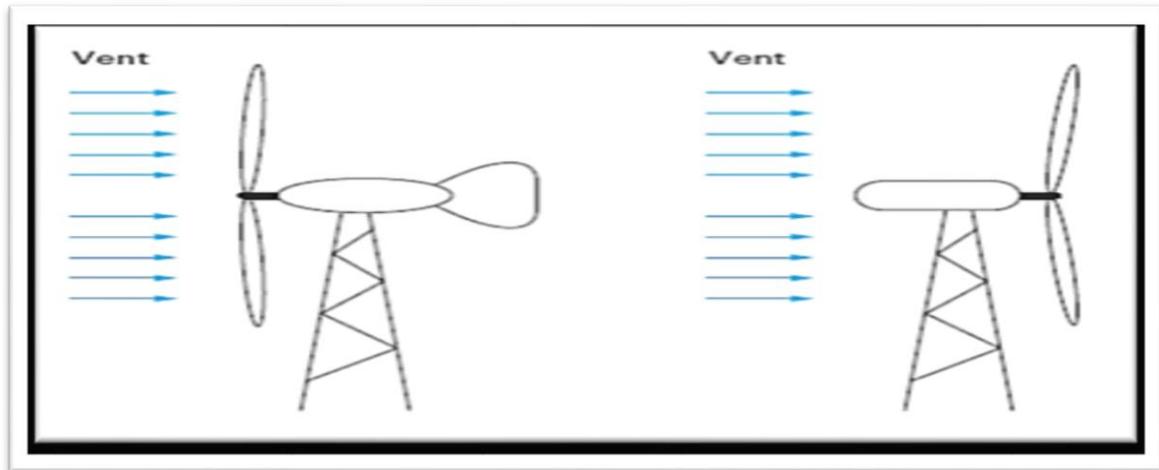
b. Eoliennes rapides (Aérogénérateurs) :

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement, Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

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

- ❖ **Amont** : Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- ❖ **Aval** : Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées Selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction



Eolienne Amont

Eolienne Aval

Figure II-20 : Configuration à axe horizontal [48]

II-11-2-3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal :

Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
- Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.
- Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [49].
- Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus

efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch) [50].

II-12. L'énergie éolienne dans le monde :

Parmi toutes les énergies renouvelables, hormis celle de la biomasse, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires mouture du blé et le pompage de l'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 3.000 ans avant J.C. environ.

Le nombre sans cesse croissant des aérogénérateurs qui se relie de par le monde à des réseaux électriques témoigne du grand succès atteint par cette technologie.

En effet, près d'un quart de siècle après le renouveau de cette filière, d'abord au Danemark Unis, puis en Allemagne, en Inde et maintenant en Espagne, en Chine, au Japon et en Amérique latine, la puissance électrique d'origine éolienne installée dans le monde adépassée les 150.000 MW fin 2012 comme le montre la figure .II-21 [51]

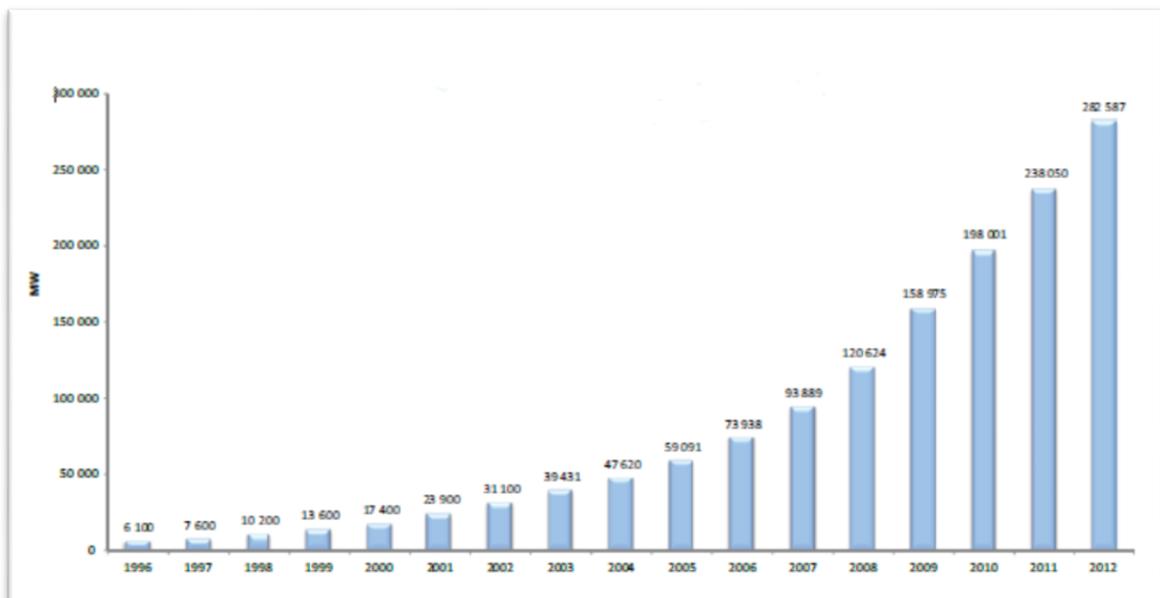


Figure II-21: Evolution de la puissance électrique d'origine éolienne installée dans le monde [51]

II-13.L'énergie éolienne en Algérie :

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger), Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie.

De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. [52]



Figure II-22:Eolienne de 100 kW [52]

Et comme tout le monde le sait, l'Algérie est un pays de tiers monde, qui compte principalement sur l'hydrocarbure, mais cela ne l'empêche pas de tracer un programme très intéressant concernât l'exploitation des énergies renouvelables qui atteindra 2600 MW pour le marché national avec une possibilité d'exportation allant jusqu'à 2000MW en 2020 ; et atteindra 12000 MW en 2030 avec une possibilité d'exportation de 10000 MW. [53]

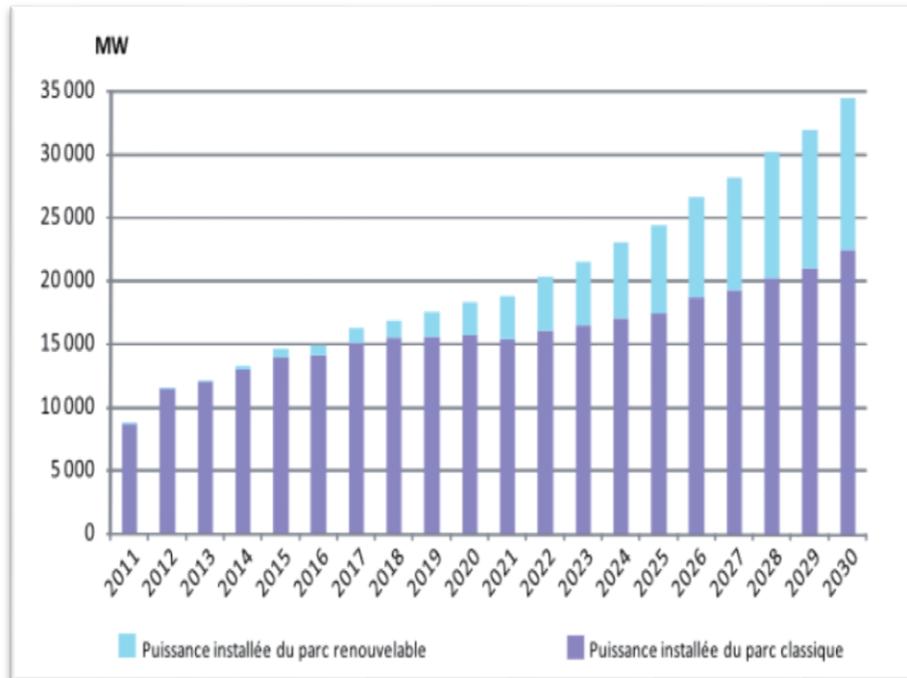


Figure II-23:structure du parc de la production nationale en MW [53]

II-14.Moulins à vent dans la ville :

Les petites éoliennes montées sur des toits ou des ponts élargissent les possibilités d'utiliser des sources d'énergie renouvelables directement dans les centres-villes, En plus des panneaux solaires, l'installation de petites éoliennes est particulièrement utile dans des villes comme Göteborg - avec beaucoup d'heures de vent. Outre la vitesse maximale du vent se trouve en hiver, la période de l'année où la production d'énergie solaire est plus faible en raison du temps nuageux et des nuits plus longues.

L'énergie éolienne pourrait donc être un complément efficace à l'énergie solaire.

En se référant aux progrès techniques qui ont été réalisés au cours des dernières années et aux projets déjà réalisés, les avantages des éoliennes urbaines peuvent être prouvés de toute façon. Avec les bonnes solutions et l'expertise, l'efficacité des petites éoliennes a été considérablement augmentée.

Tout d'abord, le bon placement des turbines par rapport au bâtiment a un effet important sur la quantité d'énergie générée. Soit montées au-dessus du milieu du toit, soit fixées aux bords d'un bâtiment, les turbines utilisent des régions de flux d'air accéléré. Rien que la double vitesse du vent se traduirait par huit fois plus d'énergie.



Figure II-24 : vent dans la ville [54]

De plus, des dimensions plus petites, des formes sphériques et surtout l'introduction d'éoliennes à axe vertical réduisent fortement l'impact du bruit et des vibrations. Parce que le niveau de bruit de fond dans une ville est omniprésent et augmente avec des vents plus forts, les bruits des éoliennes en fonctionnement sont rarement audibles. [54]

II-15.Éolienne de mer :

Une éolienne en mer ou éolienne offshore est une éolienne implantée au large des côtes plutôt que dans les terres, pour mieux utiliser l'énergie du vent et produire de l'électricité grâce à une turbine et à un générateur électrique.



Figure II-25 : Éolienne de mer [55]

Il existe deux principaux types d'éoliennes en mer : les éoliennes fixes, qui sont implantées sur des hauts-fonds, et les éoliennes flottantes qui offrent l'avantage de pouvoir être construites sur terre et implantées dans des zones où la profondeur des fonds marins ne permet pas la construction de fondations.

Éoliennes sur le parc éolien de Thorntonbank (28 km des côtes belges en Mer du Nord) ; la partie émergée mesure 157 m de haut, soit 184 m au-dessus du fond marin ; le diamètre balayé est de 126 m, chaque pale mesurant 61,5 m ; puissance de cinq MW par turbine « RE power », Les vents marins sont plus forts et plus réguliers que sur terre [55]

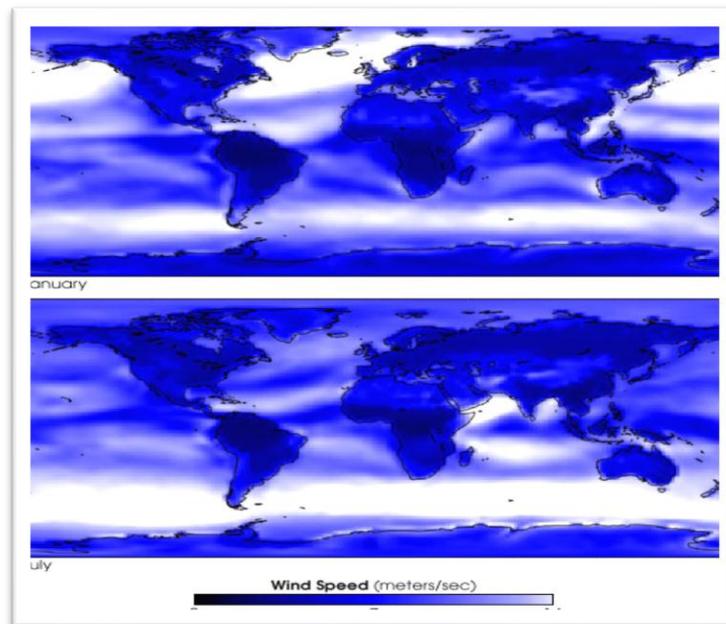


Figure II-26 : la couleur claire indique les zones les plus ventées [55]

II-16. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne : [56]

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

Avantage:

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

- 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. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

Inconvenient:

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.

Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

II-17.Mesure du vent :

Au sol, en mer et en altitude, le vent se mesure en kilomètres par heure, en mètres par seconde ou en nœuds.

Les stations météorologiques utilisent des anémomètres (indiquant la vitesse) et des girouettes (ou manches à air) (indiquant la direction) pour effectuer des mesures directes sur terre ou sur mer, Les anémomètres mécaniques sont constitués de coupes à vent qui tournent autour d'un axe lorsque le vent souffle. Il existe d'autres versions, notamment celles dites à fils chauds, où la variation de température de la thermistance provoquée par le flux d'air correspond à la vitesse de ce dernier.



Figure II-27 : Anémomètre et girouette [57]

Les changements de vent avec la hauteur sont surveillés par des radiosondes ou par le mouvement de ballons-sondes mesuré à partir du sol. L'utilisation d'un théodolite pour mesurer le déplacement d'un ballon ascendant sans utiliser de sonde est une alternative économique aux radiosondes. Le radar météorologique Doppler, les profileurs de vent, le lidar Doppler et le sodar sont également des instruments de télédétection au sol capables de mesurer la vitesse du vent à haute altitude.

À l'aide de certains instruments radar des satellites météorologiques, les vents peuvent être estimés depuis l'espace partout sur Terre, y compris dans les lieux inhabités (déserts, montagnes, océans). C'est aussi le moyen d'estimer les vents sur d'autres planètes. En 2018, un nouvel instrument appelé Aladin a été envoyé en orbite (Aeolus) pour mieux cartographier (en temps réel) les vents dans la colonne atmosphérique dans le cadre du programme Living Plante d'Euros pace Bureau, Le programme vise à mieux observer la Terre et comprend également des missions Cryostat, SMOS ou GOCE41.

En aviation, la vitesse du vent est estimée à l'aide de deux tubes de Pitot, le premier opposé à la direction du mouvement et la seconde perpendiculaire à la direction du mouvement, si les marins n'avaient pas d'instrument pour la mesurer, ils utilisaient l'échelle de Beaufort (une échelle fermée à 13 niveaux allant de l'intensité 0 à l'intensité 12) pour estimer sa force, cette échelle relie l'effet du vent sur la surface de la mer (hauteur des vagues, production d'embruns, etc.) à sa vitesse. [57]

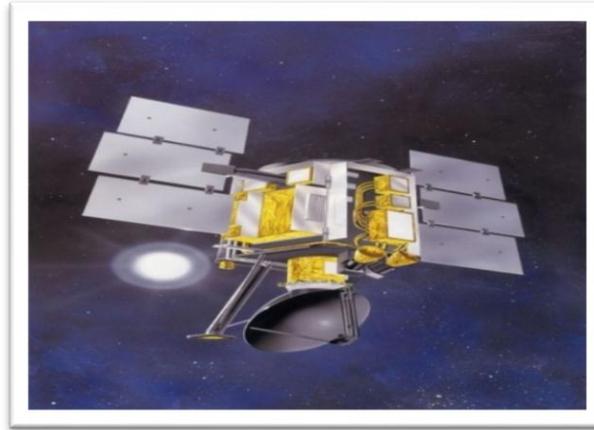


Figure II-28 : Satellite Quissac qui mesure les vents grâce à un diffus mètre [57]

II-18.Raccordement au réseau électrique :

Le raccordement d'éoliennes au réseau global de distribution électrique (sans stockage local de l'énergie) nécessite, comme pour les autres centrales de production électrique, des lignes hautes tension. La concentration des éoliennes en parcs terrestres, côtiers ou maritimes correspond à une logique de centralisation de l'offre de courant, [58]

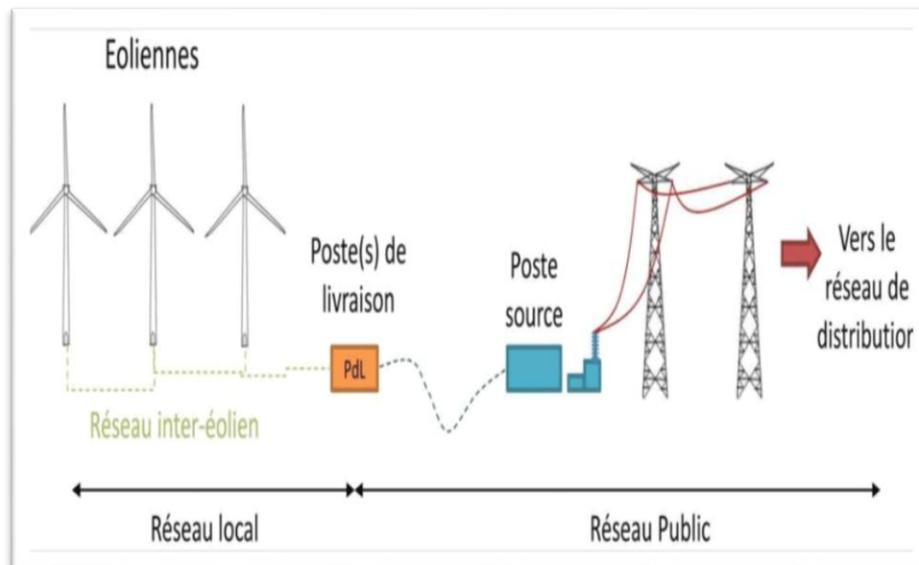


Figure II-29 : Raccordement au réseau électrique [58]

II-19.Différents types de réseaux : [59]

Vous pouvez donc revendre l'électricité que vous produisez via l'éolienne en réinjectant le surplus au réseau. Mais, vous pouvez aussi utiliser cette électricité pour votre propre consommation. Dans ce cas, pour raccorder votre éolienne à votre domicile, vous avez le choix entre trois types de réseaux

II-19-1. Réseau parallèle : vous utilisez à la fois le réseau électrique classique et l'électricité produite par votre éolienne domestique. Certaines de vos prises seront donc alimentées par l'éolienne domestique et les autres par le réseau classique.

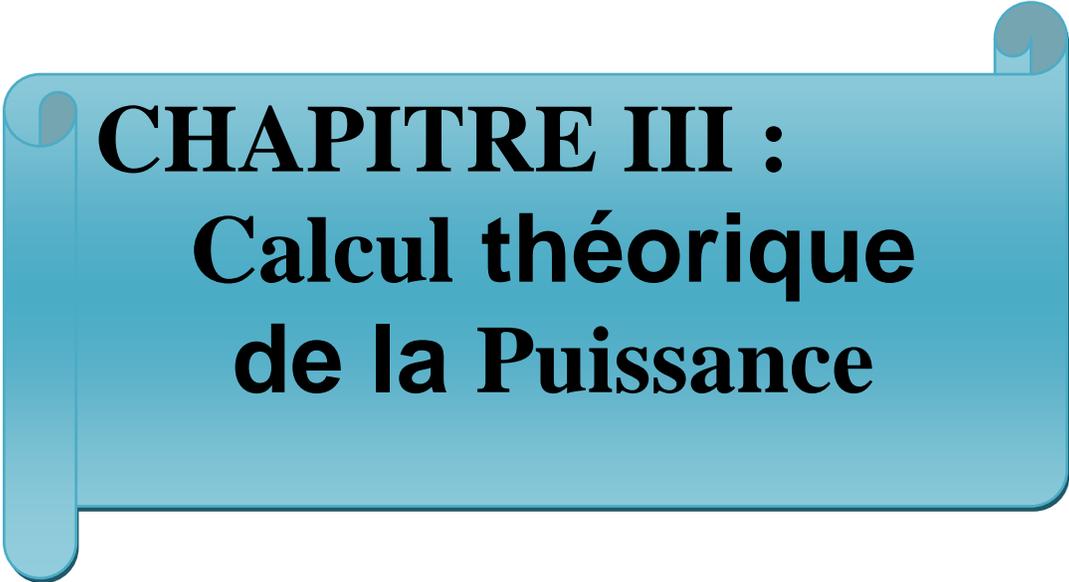
II-19-2. Réseau temporaire : votre consommation électrique est alternativement couverte par l'éolienne domestique et par le réseau classique. Un boîtier de dérivation bascule sur l'éolienne quand les batteries sont chargées et passe sur le réseau quand les batteries sont vides.

II-19-3. Réseau autonome : la totalité de votre consommation est couverte par l'éolienne domestique.

II-20. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons touchés aux différents composants d'une éolienne moderne (à axe horizontal), différents types à axe horizontale et à axe vertical et leurs fonctionnements.

De ce faite nous serons capables de faire la différence entre les différents types d'éoliennes qui existent, cela va nous aider à concevoir notre banc d'essai.



CHAPITRE III :
Calcul théorique
de la Puissance

III-1. Énergie fournie par le vent :

III-1-1. Énergie cinétique :

Le vent est de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse [60] :

III-1-2.Énergie cinétique du vent :

$$E_c = \frac{1}{2} .m.v^2 \quad (III.I)$$

m : Masse du volume d'air (en kg)

v :Vitesse instantanée du vent (en m/s)

E_c : Energie cinétique (en joules)

III-2. Masse volumique de l'air :

La masse volumique de l'air (ρ) caractérise la masse d'air qui est contenue dans un mètre cube. Elle se mesure en kilogrammes par mètre cube (kg/m³). À une altitude donnée, l'air subit une pression induite par la masse de la colonne d'air située au-dessus. La masse volumique de l'air est plus importante au niveau de la mer (1,225 kg/m³ à 15 °C) et décroît avec l'altitude.

III-2-1. Variation de la masse volumique de l'air :

La masse volumique (ρ) varie avec différents paramètres :

- L'altitude (pression de l'air) : plus l'altitude est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une même éolienne produira plus en bord de mer qu'en haute montagne avec la même vitesse de vent
- La température : plus la température est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une éolienne produira plus lorsque la température ambiante sera faible
- L'humidité relative de l'air : plus l'air sera humide et plus la masse volumique sera faible mais l'influence de l'humidité relative de l'air sur la masse volumique reste relativement faible

III-2-1-1. La masse volumique de l'air sec en fonction de la température :

La masse de l'air :

$$m = \rho.v \quad (III.2)$$

m : Masse du volume d'air (en kg)

v : volume d'air occupé (en m³)

ρ : Masse volumique (en kg/m³)

Dans le cas de l'éolien, le volume d'air occupé dépend de la surface balayée par le rotor de l'éolienne. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde

Le gaz parfait est [61] :

$$pv = nRT \quad (\text{III.3})$$

P : la pression de l'air (1 013,25 Pa)

v : Volume d'air occupé (en m³)

n : Nombre de mol (en mol)

R : la constante universelle des gaz parfaits (8,3144621 J·K⁻¹·mol⁻¹)

T : la température (K).

D'après la loi des gaz parfaits, la masse volumique de l'air s'écrit :

$$\rho = \frac{PM}{RT} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (\text{III.4})$$

P : la pression de l'air (Pa)

M : la masse molaire de l'air (28,966.10⁻³ kg/mol)

R : la constante universelle des gaz parfaits (8,3144621 J·K⁻¹·mol⁻¹)

T : la température (K)

Pour $T_{15} = 288,15$ K (15 °C), température de l'atmosphère ISA : $\rho_{15} = 1,225$ kg/m³

Ceci est généralisé en :

$$\rho = 1,292 \cdot \frac{273,15}{T} \quad (\text{III.5})$$

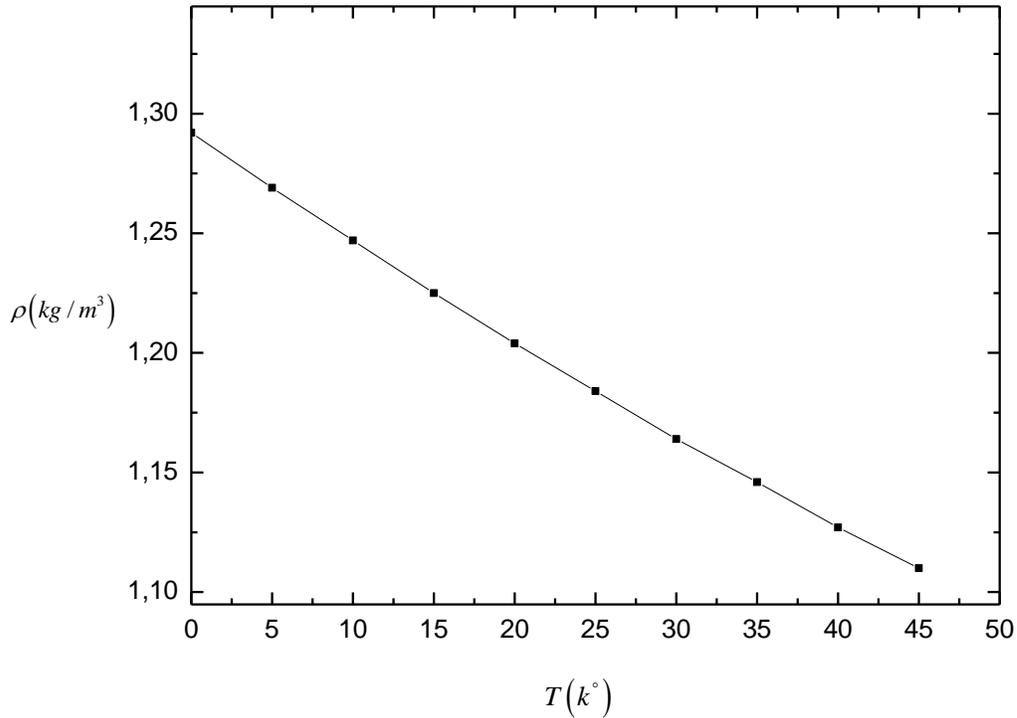


Figure III-1 : la masse volumique de l’atmosphère en fonction de la température

Remarque :

La masse volumique en fonction de la température plus la température augment plus la masse volumique démunie d'une façon linéaire

III-2-1-2. La masse volumique de l'air en fonction de l'altitude :

Pour le gradient de température précédemment décrit, on établit la formule du nivellement barométrique [62]

$$p(z) = p_0 \left(1 - \frac{a}{T_0} z \right)^{\frac{Mg}{Ra}} \tag{III.6}$$

En supposant que l’atmosphère se comporte approximativement comme un gaz parfait, calculons sa masse volumique $\rho(z)$

$$pv = nRT \tag{III.7}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{n} \frac{p}{RT} = \frac{M}{R} \frac{p}{T} \quad (\text{III.8})$$

Où $M = \frac{m}{n}$ désigne la masse molaire de l'air. Selon le modèle du nivellement barométrique

$$\rho(z) = \frac{M}{R} \frac{p(z)}{T(z)} = \frac{M}{R} \frac{p_0}{T_0 - az} \left(1 - \frac{a}{T_0} z \right)^{\frac{Mg}{Ra}} \quad (\text{III.9})$$

M : la masse molaire de l'air ($28,966 \cdot 10^{-3}$ kg/mol)

R : la constante universelle des gaz parfaits ($8,3144621$ J·K⁻¹·mol⁻¹)

T : la température ($15+273,15$ K).

P : la pression de l'air ($1013,25$ Pa)

G : Accélération de pesanteur standard ($9,805$ m/s²)

a : Gradient de température vertical ($0,0065$ k/m)

Z : l'altitude (0m à 1100m)

Pour une altitude z exprimée en mètres, la fonction suivante donne la masse volumique de l'atmosphère exprimée en kg/m³

$$\rho(z) = 352.995 \frac{(1 - 0.0000225577z)^{5.25516}}{288.15 - 0.0065z}$$

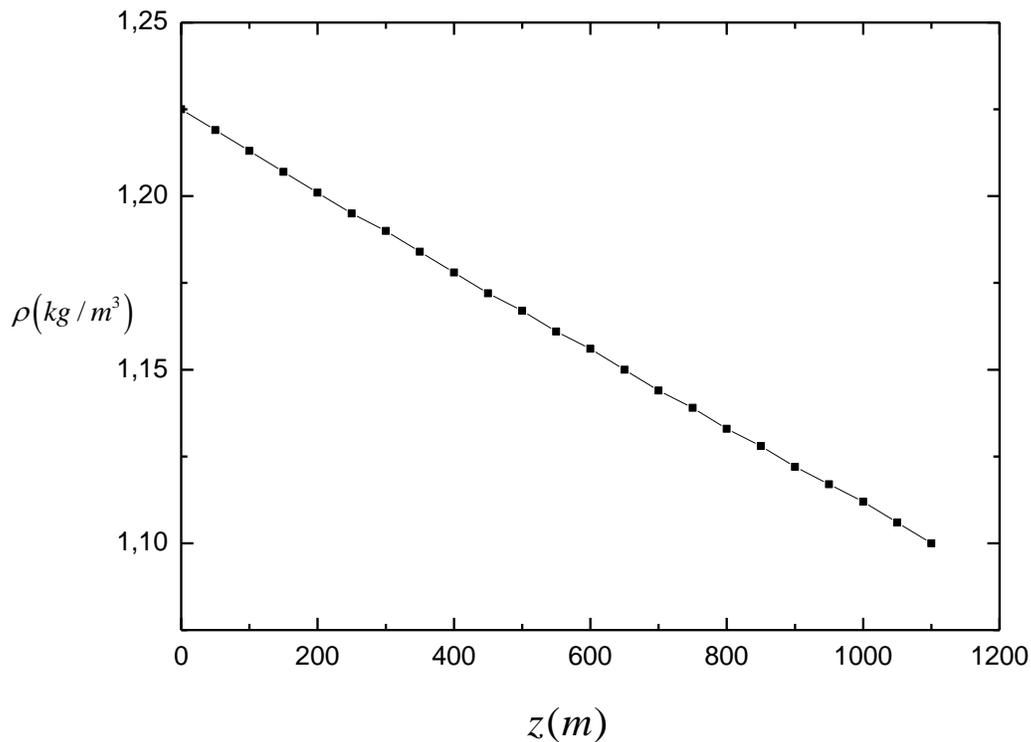


Figure III-2. La masse volumique de l’atmosphère en fonction de l’altitude

Remarque :

La masse volumique en fonction de l’altitude plus l’altitude augmente plus la masse volumique diminuée d’une façon linéaire

III-3. Énergie théoriquement récupérable :

En considérant un dispositif de récupération de cette énergie de surface S et en faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est identique en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse cette surface en 1 seconde est égal à $v \cdot S$. [60]

III-3-1. Puissance théoriquement récupérable :

$$P = E_{c/s} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v \cdot S \cdot v^2 \tag{III.10}$$

P : Puissance récupérable (Watt)

Pm : débit massique du volume d'air traversant la surface S en 1 seconde (kg/s)

$Pm\rho_0$: masse volumique de l'air (kg/m3)

v : vitesse de l'air traversant le dispositif (m/s)

S : surface du dispositif de récupération (m²)

vS : Débit volumique d'air (m³/s)

Ce qui revient à la formule qui suit.

Puissance du vent contenue dans un cercle de section S

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (III.11)$$

ρ : Masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

S : Surface du les pales en ($s = \pi R^2$ en m²)

R : rayon de pale (21,7m)

v : vitesse du vent (en m/s)

Cette puissance est une puissance théorique, il est bien sûr impossible qu'elle soit récupérée tel quelle par une éolienne (cela reviendrait à arrêter le vent).

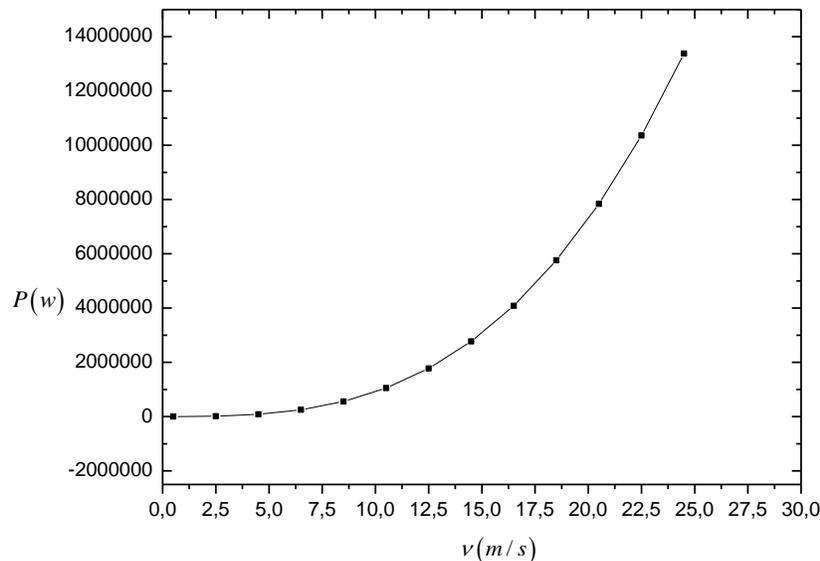


Figure III-3. Puissance du vent en fonction de la vitesse

Remarque :

La courbe caractérisent La puissance notre que celle-ci est constant de la valeur (0 jusqu'à 8m/s) a

Partir de cette dernière la puissance augment jusqu'à la limite de la vitesse (25m/s) au de la de cette vitesse d'arrêt de éolienne est obligatoire a cause la des pales ruptures.

III-4. Les éoliennes détournent le vent :

En pratique, une éolienne sert à récupérer l'énergie du vent, en contrepartie celle-ci dévie le vent avant qu'il atteigne la surface balayée par le rotor. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent (voir loi de Betz). Lorsque l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor, le vent est freiné par celui-ci, la vitesse du vent à en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval. Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortant. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante. [60]

III-4-1. Limite de Betz/Formule de Betz :

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

La puissance maximale récupérable

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_{\text{cinétique}} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{III.12})$$

$$\text{Avec } P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Lorsque } v_{\text{aval}} = \frac{1}{3} \cdot v_{\text{amont}} \quad (\text{III.14})$$

ρ : Masse volumique du fluide (air atmosphérique sec, environ : 1,23 kg/m³ à 15 °C et à pression atmosphérique 1,0132 bar)

S : Surface du les pales en ($S = \pi R^2$ en m²)

v : vitesse incidente (amont) du fluide (en m/s)

III-4-2. Démonstration de la limite de Betz :

Les aérogénérateurs transforment l'énergie cinétique de l'air en énergie électrique. La théorie de Betz permet de déterminer le rendement maximal d'un aérogénérateur. Elle tient compte de la quantité maximale de vent qu'un aérogénérateur peut capter. La théorie est détaillée ci-dessus : On suppose que

l'éolienne est placée dont un cylindre de section S_1 d'air en amont animé d'une vitesse V_1 et dans un cylindre de section en aval animé d'une vitesse V_2 .

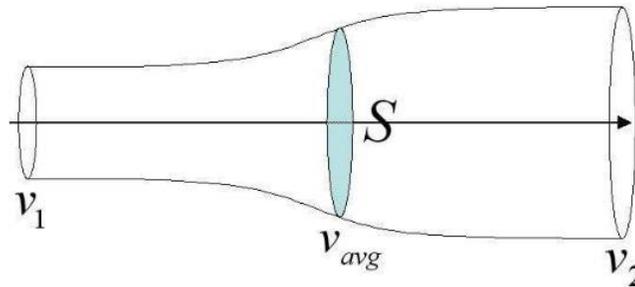


Figure III-4. Tube d'air

On appelle respectivement V et S la vitesse et la section au niveau de l'hélice.

Comme l'éolienne récupère l'énergie cinétique du vent on a : $V_1 > V_2$ Par conservation du débit, on obtient la relation :

$$S_1 \cdot V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2 \quad (\text{III.15})$$

On en déduit $S_1 < S_2$

Le théorème d'Euler nous donne la force F exercée par le moteur éolien sur l'air en mouvement dirigé vers l'avant de l'éolienne :

$$F = \rho \cdot S \cdot V (V_1 - V_2) \quad (\text{III.16})$$

De cette force on en détermine la puissance ($p = F \cdot V$)

$$P = \rho \cdot S \cdot V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{III.17})$$

On considère maintenant que cette puissance est égale à la différence d'énergie cinétique de la masse d'air qui traverse l'éolienne par seconde ($P = \Delta E$) :

$$\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) = \Delta E = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.18})$$

On en déduit : $V = \frac{V_1 - V_2}{2}$

On injecte V dans les expressions de F et de P :

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.19})$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III.20})$$

On étudie maintenant la variation de la puissance en fonction de la vitesse résiduelle V_2 en supposant que V_1 reste constant :

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho \cdot S (V_1^2 - 2 \cdot V_1 \cdot V_2 - 3 \cdot V_2^2) \quad (\text{III.21})$$

Recherche le maximum de P en fonction V_2 de revient à trouver de l'équation ci-dessus.

On trouve $V_2 = -V_1$ (ce qui n'a pas de sens physique) et $V_2 = V_1/3$

On peut maintenant donner une expression de la puissance maximale du vent qu'une éolienne peut capter :

$$P_{MAX} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{III.22})$$

Dans ces conditions, on a $V = 2/3 V_1$ et donc $S = 3/2 S_2$. De plus on sait que l'énergie cinétique de la masse d'air par seconde vaut :

$$E_{Cair} = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot V_1^3 \quad (\text{III.23})$$

On peut écrire la relation suivante :

$$P_{MAX} = \frac{8}{9} \left(\frac{1}{3} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \right) = \frac{16}{27} E_{Cair} \quad (\text{III.24})$$

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à $\frac{16}{27}$, soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

Dans le cas d'une hélice de diamètre D, la limite de Betz est égale à :

$$p = 0,16 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot v^3 \quad (\text{III.25})$$

$$p = 0,12 \cdot D^2 \cdot v^3 \quad (\text{III.26})$$

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle :

- au carré des dimensions du rotor
- au cube de la vitesse du vent

Courbe ci-contre pour une hélice de diamètre $D = 43,4\text{m}$.

C_p : Le coefficient de puissance (0,27)

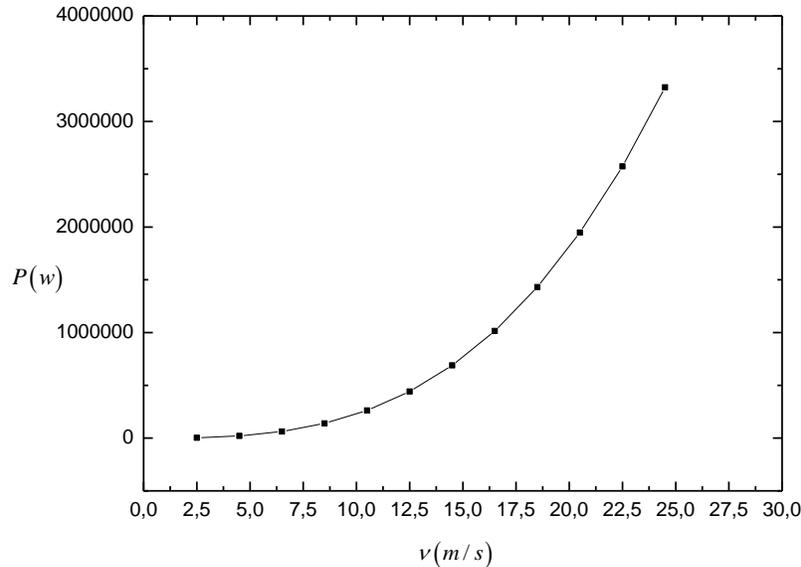


Figure III-5. La Limite de Betz en fonction de la vitesse de vent

Remarque :

En utiliser la limite de batz ce résultant obtenus de la puissance en fonction de la vitesse sent respectés

III-5. Répartition de la vitesse du vent :

On décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant une distribution de Wei bull comme celle que vous voyez, C'est le modèle général qui décrit les variations de la vitesse du vent. Ce modèle permet d'optimiser la conception des éoliennes pour minimiser les coûts liés à la production d'électricité.

Le coefficient de Wei bull traduit la distribution des vitesses du vent et est déterminé par la courbe de distribution Wei bull. [60]

III-5-1. Construction :

On mesure la vitesse moyenne du vent toutes les 10 minutes au moyen d'un anémomètre. Les valeurs obtenues sont alors réparties en différentes vitesses de vent. On peut alors exprimer le potentiel énergétique d'un site en fonction de la fréquence des différentes classes de vitesse.

III-5-2. Fonction de probabilité de densité de Wei bull :

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \tag{III.27}$$

$$f(v) = c^{-k} \cdot v^{(k-1)} \cdot e^{-(v/c)^k} \tag{III.28}$$

La fonction de probabilité de densité de Wei bull destinés à refléter la probabilité qu'un événement se produise entre deux points. L'aire sous la courbe entre deux vitesses de vent supérieures à zéro sera égale à la probabilité que le vent souffle quelque part entre ces deux vitesses. Sur la courbe de puissance ci-contre, nous pouvons déterminer les constantes des paramètres de Wei bull :

(k) Est le facteur de forme de Wei bull. Il donne la forme de la distribution et prend une valeur comprise entre 1 et 3. Plus la valeur est faible et plus la vitesse du vent est variable tandis-que qu'une valeur de k élevée indique une vitesse de vent constante.

(c) Est le facteur d'échelle de Wei bull exprimé en m/s. Il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. (c) Est proportionnel à la vitesse moyenne du vent.

Dans le cas de la courbe ci-contre :

- paramètre de forme : $k = 1,751311$
- paramètre d'échelle : $c = 5,986052$.

L'aire sous la courbe est définie par :

$$F(v) = 1 - e^{-(v/c)^k} \tag{III.29}$$

Dans l'exemple ci-contre, la probabilité pour que le vent souffle entre 3 m/s et 4 m/s est de : $F(4) - F(3) = 0,38958 - 0,25788$ soit 13,17%

III-5-3. La distribution de Rayleigh:

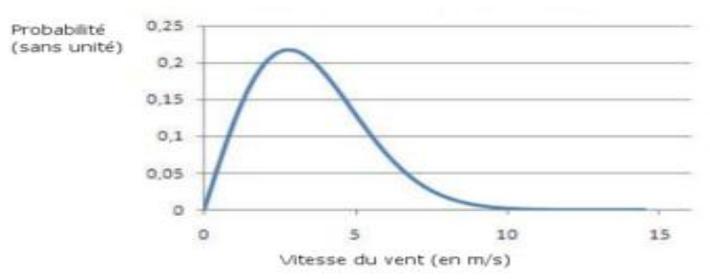


Figure III-6.La distribution de Rayleigh

Courbe de distribution de Rayleigh pour une valeur moyenne en vent de 3,94 m/s

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2. Les fabricants fournissent souvent les calculs de performance en utilisant la distribution de Rayleigh.

Distribution de Rayleigh

III-6. Vitesse angulaire du rotor :

La vitesse angulaire ω , aussi appelée fréquence angulaire ou pulsation, est une mesure de la vitesse de rotation. C'est-à-dire un angle par seconde. [60]

vitesse angulaire

$$\omega = 2\pi \cdot f \tag{III.30}$$

ω : vitesse angulaire (en rad/s)

f : fréquence de rotation du rotor (en 32,8 tour/min)

III-6-1. Vitesse tangentielle :

Soit une hélice immobile dont l'axe de rotation est parallèle au vent, pour chaque pale on peut tracer la résultante perpendiculaire au profil appliquée au centre de la poussée aérodynamique.

On obtient:

- T_1 et T_2 parallèles et de même sens qui ont tendance à déplacer l'hélice dans un mouvement de translation dans la direction du vent
- P_1 et P_2 parallèle et de sens opposé, perpendiculaire à la direction du vent

Ces deux forces créent un couple moteur qui a tendance à faire tourner l'hélice dans un plan perpendiculaire à la direction du vent.

III-6-2. Vitesse du vent créé par le déplacement de la pale :

$$U = \omega \cdot r = 2\pi \cdot f \cdot r = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot r \tag{III.31}$$

U : vitesse du vent dû au déplacement de la pale ou vitesse tangentielle (en m/s)

ω : vitesse angulaire du rotor (en rad/s)

r : distance du point considéré à l'axe de rotation (en m)

f : Fréquence de rotation du rotor (en tour/seconde)

n : Fréquence de rotation du rotor (en 32,8 tour/min)

III-6-3.Vitesse relative :

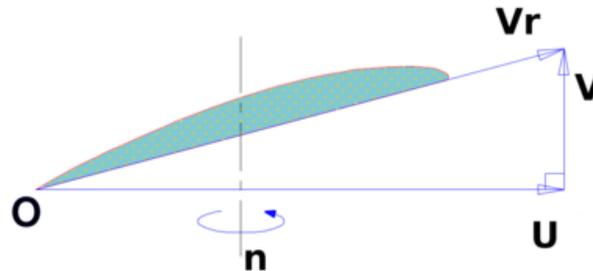


Figure III-7.La vitesse relative

Composition de la vitesse relative :

Le vent vu par la pale est en fait une composition du vent réel et du vent créé par le déplacement de la pale (qui varie sur toute la longueur de la pale proportionnellement au rayon), ce vent résultant est appelé vent apparent ou vent relatif, la vitesse de ce vent résultant par rapport à la pale est supérieure à la vitesse propre de la pale.

D’après le théorème de Pythagore, la vitesse relative au carré est donnée par la somme des carrés de la vitesse du vent et la vitesse tangentielle de la pale.

Vitesse relative de la pale :

$$v_r = \sqrt{v^2 + U^2} \tag{III.32}$$

v_r : vitesse relative de la pale (en m/s)

v : vitesse du vent (en m/s)

U : vitesse tangentielle du point considéré (en 74,53 m/s)

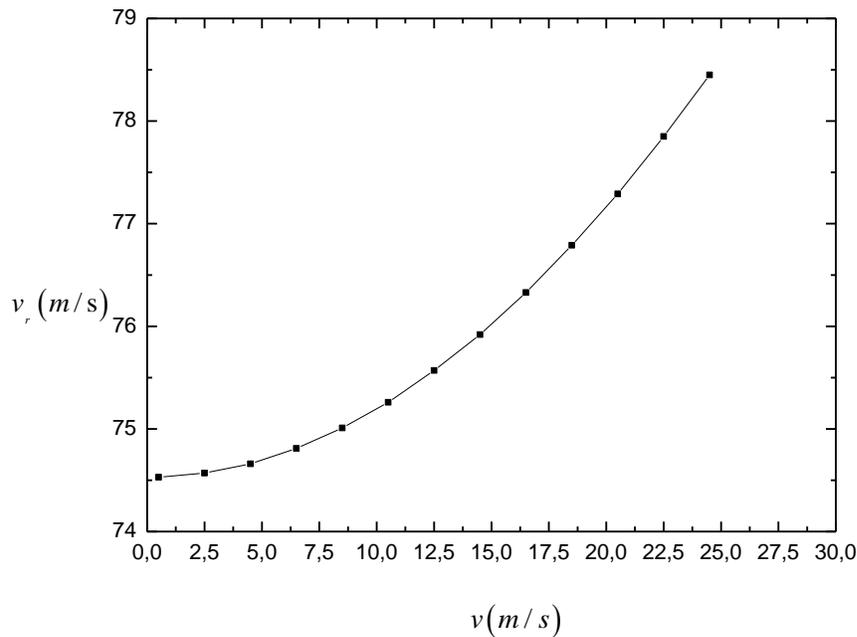


Figure III-8. La vitesse relative de la pale en fonction de la vitesse de vent

Remarque :

En ce qui concerne de la vitesse relative composée de vent réel en du vent crée par le déplacement de la pale et à petit l'air de (0 jusqu'à 5 m/s) et à partir de cette dernière valeur du la vitesse croissant jusqu'à la limite de vitesse (25 m/s)

III-7. La vitesse spécifique :

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ (Lambda) en anglais Tip Speed Ratio (TSR) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre. [60]

- Si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente
- Si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide

Par exemple, une éolienne bipale peut avoir un paramètre λ égal à 20.

Vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\omega \cdot R}{v} \tag{III.33}$$

λ : Vitesse spécifique (sans unité)

U : vitesse de l'extrémité des pales (en m/s)

v : vitesse du vent (en m/s)

R : Longueur des pales ou rayon de la turbine (en 21,7 m)

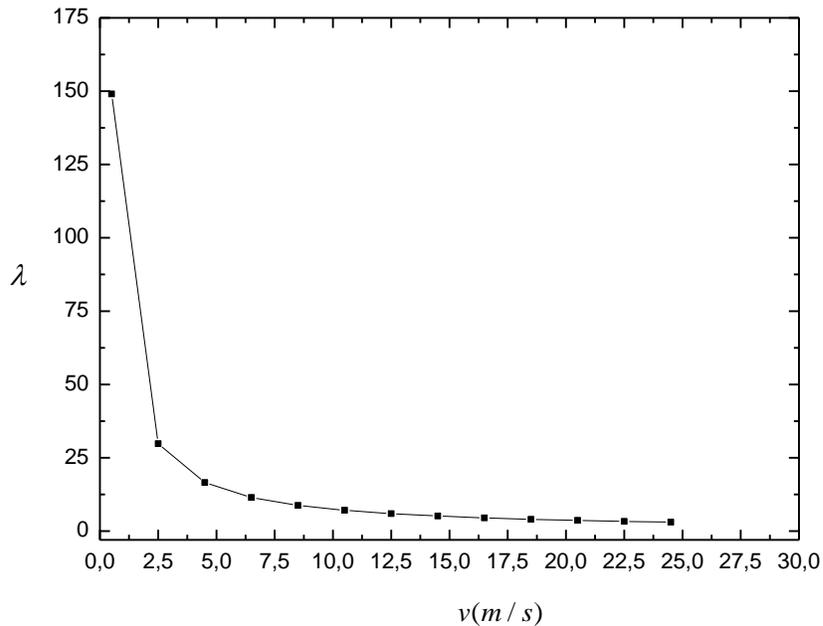


Figure III-9. La vitesse spécifique en fonction de la vitesse de vent

Remarque :

La vitesse spécifique d'après le figure ci-dessus tant vers (0m/s) lorsque la vitesse spécifiques dépasse (25m/s) éolienne d'air sarrète

III-8. Rendements :

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant convertit d'une forme à une autre, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations. [60]

- Hélice : $0,20 < \eta < 0,85$
- Le multiplicateur ou le réducteur : $0,7 < \eta < 0,98$
- L'alternateur ou la génératrice continue : $0,80 < \eta < 0,98$
- Le transformateur : $0,85 < \eta < 0,98$
- Le redresseur : $0,9 < \eta < 0,98$
- Les batteries : $0,7 < \eta < 0,8$
- Les pertes de lignes : $0,9 < \eta < 0,99$

Les rendements de chaque élément varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, il semble difficile de dépasser 70% de la limite de Betz.



Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale:

Dans le cadre de ce travail nous avons entrepris l'étude d'une éolienne, après avoir fait une généralité sur l'énergie renouvelable et passé en revue les formules nécessaires à toute l'étude du dispositif éolien nous avons dressé un état sur les résultats obtenus.

Notre intérêt a porté par la suite les différents facteurs influant sur la puissance, parmi ces facteurs on peut citer la masse volumique la température l'altitude ET la vitesse de l'air.

En finale il apparaît clairement que la puissance EST une fonction proportionnelle de la vitesse qui joue un rôle prépondérant de l'air.

En outre l'augmentation de la vitesse des pales favorise l'amélioration du rendement de l'éolienne, par ailleurs la rotation des pales est limitée à une vitesse du vent qui ne détériore pas l'éolienne.

Ainsi j'espère que ce travail sera utile pour initier de nombreux gens qui s'intéressent à l'aspect génie mécanique et précisément à l'étude des éoliennes dans les différents sites (mers, plateaux et montagnes).

Annexes

Table numérique de la masse volumique de L'atmosphère en fonction de la temperature:

T en K°	ρ kg/m3
0	1,292
5	1,269
10	1,247
15	1,225
20	1,204
25	1,184
30	1,164
35	1,146
40	1,127
45	1,110

$$\rho = \frac{PM}{RT} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Table numérique de la masse volumique de l'atmosphère en fonction de l'altitude:

Z en m	ρenkg/m3	Z en m	ρenkg/m3
0	1,225	600	1,156
50	1,219	650	1,15
100	1,213	700	1,144
150	1,207	750	1,139
200	1,201	800	1,133
250	1,195	850	1,128
300	1,19	900	1,122
350	1,184	950	1,117
400	1,178	1000	1,112
450	1,172	1050	1,106
500	1,167	1100	1,1
550	1,161		

$$\rho(z) = \frac{M}{R} \frac{p(z)}{T(z)} = \frac{M}{R} \frac{p_0}{T_0 - az} \left(1 - \frac{a}{T_0} z \right)^{\frac{Mg}{Ra}}$$

Annexes

Puissance théoriquement récupérable:

$v(m/s)$	$p(w)$
0,5	113,7245
2,5	14215,5625
4,5	82905,1605
6,5	249852,727
8,5	558728,469
10,5	1053202,59
12,5	1776945,31
14,5	2773626,83
16,5	4086917,36
18,5	5760487,1
20,5	7838006,26
22,5	10363145,1
24,5	13379573,7

$$P_{cinétique} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

Puissance maximal de La Limite de Betz:

$v(m/s)$	$p(w)$
0,5	28,2525
2,5	3531,5625
4,5	20596,0725
6,5	62070,7425
8,5	138804,533
10,5	261646,403
12,5	441445,313
14,5	689050,223
16,5	1015310,09
18,5	1431073,88
20,5	1947190,55
22,5	2574509,06
24,5	3323878,37

$$P_{MAX} = \frac{8}{9} \left(\frac{1}{3} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \right) = \frac{16}{27} E_{Cair}$$

Annexes

La vitesse relative en fonction du vent :

$v(m/s)$	$v_r(m/s)$
0,5	74,53
2,5	74,57
4,5	74,66
6,5	74,81
8,5	75,01
10,5	75,26
12,5	75,57
14,5	75,92
16,5	76,33
18,5	76,79
20,5	77,29
22,5	77,85
24,5	78,45

$$v_r = \sqrt{v^2 + U^2}$$

La vitesse spécifique en fonction du vent :

$v(m/s)$	λ
0,5	149,06
2,5	29,812
4,5	16,562
6,5	11,466
8,5	8,768
10,5	7,098
12,5	5,962
14,5	5,14
16,5	4,516
18,5	4,02
20,5	3,635
22,5	3,312

$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\omega.R}{v}$$

Références Bibliographiques

- [1] TRAORE Massitan «GESTION DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE D'UNE ALIMENTATION PRIVEE CONNECTE AU RESEAU» MEMOIRE DE MASTER Sciences et Technologies : Électrotechnique UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA page 3 Année juin 2017
- [2] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable 14/02/2022 10 :50
- [3] Benoudjit Chalabia Etude pour la Conception d'un banc d'essais Pour "Energie Eolienne" Mémoire de Magister UNIVERSITE de BATNA Juin 2004 p07
- [4] KARBOUA Djaloul FTELINA Youcef Commande d'une Eolienne Mémoire de Master Université Ziane Achour de Djelfa 2018-2019
- [5] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679> 20/2/2022 15:20
- [6] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-deux-formes-du-solaire-le-solaire-photovoltaique-et-le-solaire-thermique> 25/02/2022 9:30
- [7] <https://www.acteurdurable.org/energie-solaire-thermique/> 17/05/2022 11:48
- [8] EAU CHAUDE SANITAIRE SOLAIRE Application à l'individuel et au collectif Guide Pour L'installateur éditeur Sebtp Se Tp 6-14 rue la Pérouse 75784 Paris Cedex 16 Septembre 2013. page 18-19
- [9] https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux_stockage/passer-a-l'action/produire-lelectricite/solaire-thermodynamique 26/02/2022 10 :10
- [10] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/4/> 26/02/2022 16 :20
- [11] <https://www.lenergiétoutcompris.fr/actualites-conseils/solaire-thermodynamique-fonctionnement-et-types-de-centrales-48118> 28/02/2022 9:00
- [12] ATMANIA Hanane La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie Cas de la photovoltaïque Mémoire de Magister en Management Université d'ORAN-2- Mohamed ben Ahmed p74 Année 2014/2015
- [13] Maha mâh Saleh Haggag Ahmed Djeddah < Détermination De Rendement Instantanée D'un Capteur Solaire Plan Á Eau > Diplôme de Master Université Ibn Khaldoun De Tiaret Département De Génie Mécanique 15/06/2017 p1
- [14] <https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/panneau-solaire-photovoltaique-fonctionnement-et-description-les-differents-types-de-panneaux-solaires-photovoltaiques-1> 03/03/2022 11:45

Références Bibliographiques

- [15] <https://www.conservation-nature.fr/ecologie/la-production-d'energie/energie-solaire/> 03/03/2022 20:08
- [16] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [17] Mme. Benoudjit Chalabia (Ep. Ghorab) Etude pour la Conception d'un banc d'essais Pour "Energie Eolienne" Mémoire de Magister Option : Machines Electriques de l'Université de Batna 2004 p11
- [18] Grey Hoogers, Louise Poter, 'Renewable Energie World. Fuel cells rural energy. Distributed generation. Solar hot water. Achievements and potential. News. January 1999.
- [19] Omar Larbi-Bouamrane Usage D'une Biomasse Traitee Pour La Biosorption De Cu(II) Et De Bi (III) Mémoire de Universitaire Yahia Fares De Madea Mai 2005 p29
- [20] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-hydraulique-6659/> 10/03/2022 14 :20
- [21] <https://selectra.info/energie/guides/environnement/hydraulique> 1/03/2022 13:30
- [22]- Amory B. LOVINS, stratégies énergétiques planétaires, édition Christian Bourgeois, Paris 1975, page 50
- [23] <https://selectra.info/energie/guides/environnement/hydraulique> 1/03/2022 16:40
- [24] Benoudjit Chalabia (Ep. Ghorab) Etude pour la Conception d'un banc d'essais Pour "Energie Eolienne" Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique Université de Batna Juin 2004 p 10
- [25] Redjem radia : 'étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne', magistère en électrotechnique/Constantine/2009 p6
- [26] <https://www.google.com/amp/s/www.projetecolo.com/energie-geothermique-definition-avantages-et-inconvenients-150.html%3famp=1> 07/03/2022 14 :20
- [27] H. Camblong. «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse de doctorat en Automatique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Centre de Bordeaux, 2003.
- [28] S .EL -Aimani. Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005

Références Bibliographiques

- [29] AZIZ Mustapha. MCHELFEKH Abdallah thème modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Electrique Filière : Electrotechnique Université Ziane Achour De Djelfa JUILLET 2019 p04
- [30] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Vent.html> 20/04/2022 16 :10
- [31] Organisation météorologique mondiale, « Vent catabatique » [archive], Glossaire de la météorologie, Emmmental (consulté le 16 décembre 2009
- [32] E Kalnay et M. CIA, « *Impact of urbanisation and land-use change on climat* », Nature, vol. 423, 29 mai 2003, p. 528-531 (résumé [archive])
- [33] D^r Steve Ackerman, « SAE and Land Breezes » [archive], Université du Wisconsin ,1995 (consulté le 24 octobre 2006)
- [34] (En) Jet-stream: An Online School for Weather, « The SAE Breeze » [archive], National Weather Service, 2008 (consulté le 24 octobre 2006)
- [35] K. FERKOUS, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Université Mentouri constantine, 2009.
- [36] Guy Cuntz, 'éolienne et aérogénérateurs ', Guide de l'énergie éolienne, 2ème édition 1984.
- [37] KARBOUA Djaloul FTELINA Yousef Commande d'une Eolienne Pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE Université Ziane Achour de Djelfa : 04/07/2019
- [38] S. Mekhtoub « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de L'énergie éolienne », mémoire de fin d'étude en électrotechnique Ecole Nationale Polytechnique Algérie
- [39] D. A. Spera, Wind turbine technologie, 2ème ed: Asma Press, 2009.
- [40] 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).
- [41] <https://fee.asso.fr/comprendre-leolien/principes-et-fonctionnement/> 09/03/2022 11 :20
- [42] OUDANE SAMIA. Apports des convertisseurs multi niveaux dans les systèmes D'énergie éolienne Génie Electrique Université Ibn Khaldoun De Tiaret 2015 p14
- [43] Ameziane Sadek, "Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien ". Mémoire de Magister, Soutenu le 01/07/2009. Université de Batna
- [44] TARAK GHENNAM « supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de

Références Bibliographiques

machine asynchrone à double alimentation » thèse de docteur, école militaire polytechnique d'Alger, école centrale de Lille, 29/09/2011

[45] AIT RAMDANE NAÏMA « commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne » ingénieur d'état, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,03/07/2012.

[46] HASS NI NEE BELGHITRI HOUDA « modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque »mémoire magister, université Abou-bakr belkaid de Tlemcen, 2010

[47] CHERFIA NAÏM « conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens », thèse de magister, université mentouri – Constantine, 07/ 06 / 2010.

[48] HADID Mohammed MILOUDI Mohamed amine Apport des onduleurs multi niveaux dans la chaine de production éolienne Master Université Ibn Khaldoun De Tiaret Génie Electrique PROMOTION 2015 /2016

[49] METATLA SAMIR «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.

[50] www.homerenergy.com 13/03/2022 15 :34

[51]<https://www.cder.dz> > smee20...PDFL'énergie éolienne: de la source d'énergie renouvelable la moins ...3/04/2022 14:20

[52] Ameziane Sadek, "Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien ". Mémoire de Magister, Soutenu le 01/07/2009. Université de Batna.

[53] Extrait du Mem, « Programme Algérien de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables et de l'Efficacité Energétique », Algérie, Avril 2011.

[54]<https://www.smartcitiesdive.com/ex/sustainablecitiescollective/windmills-city/8807/> 15/03/2022 09 :28

[55]https://fr.m.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne_en_mer#:~:text=Une%20%C3%A9olienne%20en%20mer%20ou,et%20%C3%A0%20un%20g%C3%A9n%C3%A9rateur%20%C3%A9lectrique 27/03/2022 18 :30

[56] V.Courtesuisse, «supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique» Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole nationale d'Arts en métiers, 2008

[57] *J. Ignasse*, « Le satellite Aeolus et l'instrument Aladin vont étudier les vents terrestres », *Science & Vie*, 2018 (*lire en ligne [archive], consulté le 7 septembre 2018*).

Références Bibliographiques

[58] https://eolienne.f4jr.org/projet_eolien/raccordement 07/04/2022 10:00

[59] <https://www.quelleenergie.fr/questions/eolienne-raccordement-reseau-electrique> 09/04/2022 15:29

[60] https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique

[61] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique_de_l%27air

[62] <https://www.deleze.name> › sec2PDF Masse volumique de l'atmosphère en fonction de latitude

Résumé :

Dans le cadre de la recherche croissante de nouvelles sources de production d'énergie électrique, y compris les énergies renouvelables.

Cette note présente le contrôle du système éolien, afin d'exploiter la capacité du vent à produire de l'énergie propre sans pollution.

Cette étude théorique a été menée pour trouver la relation entre la température et la hauteur en termes de masse volumétrique comme

Nous avons calculé la puissance produite par l'éolienne.

Nous sommes donc arrivés aux résultats suivants :

Lorsque l'altitude et la température augmentent, la masse volumétrique diminue

Plus la vitesse du vent est élevée, plus la puissance est grande

Abstract:

In the framework of increasing research to new sources of production of electrical energy among them renewable energies, this thesis presents a control in wind system for objective to exploit the wind energy to produce a clean energy without pollution.

This theoretical study was conducted to find the relationship between temperature and height in terms of density as.

We calculated the power produced by the fan.

We therefore arrived at the following results:

As altitude and temperature increase, density decreases

The higher the wind speed, the greater the power

ملخص:

كجزء من البحث المتزايد عن مصادر جديدة لإنتاج الطاقة الكهربائية، بما في ذلك الطاقات المتجددة. تعرض هذه المذكرة التحكم في نظام الرياح، من أجل استغلال قدرة الرياح لإنتاج طاقة نظيفة دون تلوث، أجريت هذه الدراسة النظرية لإيجاد علاقة درجة الحرارة والارتفاع بدلالة الكتلة الحجمية كما قمنا بحساب القوة التي تنتجها المروحة.

بحيث توصلنا إلى النتائج التالية:

. - كلما زاد الارتفاع ودرجة الحرارة نقصت الكتلة الحجمية

. - كلما زادت سرعة الرياح زادت الاستطاعة

