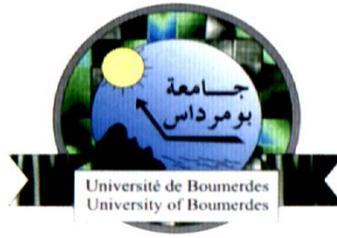


**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de L'Ingénieur
Département Génie Mécanique**

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière : génie mécanique
Spécialité : énergie renouvelable en mécanique**

THEME

Etude et conception d'une éolienne horizontale à petite échelle

Présenté par :

KHERFI Nacer

Promoteur : Mr. BOUBENIA Ahmed

Promotion 2022- 2023

Remercient

Nous remercions premièrement Allah, qui nous a donné la capacité et la patience pour terminer ce travail.

Je remercie vivement et chaleureusement mon encadreur Monsieur BOUBENIA Ahmed Docteur à l'université M'Hamed bougarà - boumerdes. Je le remercie pour son aide et ses conseils qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'achèvement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes chers parents

A mes frères et mes sœurs

A ma famille

A tous mes amis

Résume

Cet article se concentre sur une étude d'implantation d'éolienne à petite échelle à usage agricole dans un lieu isolé, sachant qu'actuellement l'électrification de ces lieux pour les besoins industriels et agricoles reste l'un des plus grands projets notamment lorsqu'il s'agit d'utiliser des énergies durables comme sources telles que l'énergie solaire, hydraulique et éolienne. L'objectif de ce travail est de valider la faisabilité d'utiliser une éolienne pour usage agricole. L'étude représentée dans cet article a été réalisée par le traitement du cas du pompage d'eau dans une localisation isolée au nord de l'Algérie à l'aide d'éolienne, considérant que ce site représente un potentiel éolien favorable et une source d'eau permanente. La conception de l'éolienne est basée sur les données climatiques, des devis sélectionnés et les moyens mis en œuvre à moindre coût et le réservoir d'eau est optimisé par rapport aux données de consommation d'eau quotidienne et d'excès d'énergie, l'énergie potentielle de l'eau stockée est utilisée pour le pompage en période de dysfonctionnement.

ملخص

تركز هذه المقالة على دراسة تركيب توربينات هوائية صغيرة الحجم للاستخدام الزراعي في مكان منعزل، علماً أن كهربة هذه الأماكن حالياً للاحتياجات الصناعية والزراعية لا تزال من أكبر المشاريع الحالية، خاصة عندما يتعلق الأمر بالاستخدام. الطاقة المستدامة. مصادر مثل الطاقة الشمسية والمائية وطاقة الرياح. الهدف من هذا العمل هو التحقق من جدوى استخدام توربينات الرياح. تم تنفيذ الدراسة الممثلة في هذا المقال من خلال معالجة حالة ضخ المياه في عرض أسعار معزول في شمال الجزائر باستخدام توربينات الرياح، مع الأخذ في الاعتبار أن هذا الموقع يمثل رياحاً مواتية. مصدر محتمل ودائم للمياه. يعتمد تصميم توربينات الرياح على البيانات المناخية للتقديرات المختارة والوسائل المنفذة بأقل تكلفة وتم تحسين خزان المياه فيما يتعلق ببيانات الاستهلاك اليومي للمياه والطاقة الزائدة، والطاقة الكامنة للمياه المخزنة يستخدم للضخ في أوقات العطل.

Abstract

This article focuses on a study of the installation of small-scale wind turbines for agricultural use in an isolated place, knowing that currently the electrification of these places for industrial and agricultural needs remains one of the biggest current projects, especially when it comes to using sustainable energy. Sources such as solar, hydro and Wind power. The objective of This work is to validate the feasibility of using a wind turbine The study represented in this article was carried out by treating the case of water pumping in an isolated quote in northern Algeria using of wind turbines, considering that this site represents favorable wind potential and a permanent source of water. The design of the wind turbine is based on the climatic data of the selected estimates and the means implemented at the lowest cost and the water tank is optimized with respect to the data of daily water consumption and excess energy, the potential energy of the stored water is used for pumping in times of malfunction.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I généralité et l'état de l'art sur l'énergie renouvelable	
I Introduction.....	4
I.1 L'énergie hydraulique.....	4
I.1.2 Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique	5
I.2 L'énergie solaire	6
I.2.1 L'énergie solaire thermique	6
I.2.1.1 Historique de l'énergie thermique	6
I.2.1.2 Principe du fonctionnement de l'énergie thermique.....	6
I.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque	7
I.2.2.1 Historique de photovoltaïque.....	7
I.2.2.2 Principe du fonctionnement de photovoltaïque	8
I.3.1 Historique de la biomasse	9
I.3.2 Principe du fonctionnement de la biomasse	9
I.4.1 Historique de la géothermique.....	10
I.4.2 Principe du fonctionnement de géothermique	11
I.5.1 Historique d'éolienne.....	12
I.5.1.2 Les moulins à vent	12
I.5.1.3 Le Moyen Âge	12
I.5.1.4 L'éolien	13
Conclusion.....	15
Chapitre II l'énergie éolienne	
II Introduction.....	17

II.1 Principe de fonctionnement	17
II.1.1 Classement des éoliennes	18
II.1.2 Taille des aérogénérateurs	18
II.2 Les éoliennes se divisent en deux grandes familles	18
II.2.1 Éoliennes à axe vertical (VAWT)	18
II.2.2 Éoliennes à axe horizontal (HAWT)	19
II.2.3 Principaux composants d'une éolienne horizontale	20
II.3 Les éoliennes à petite échelle	23
II.3.1 Conception.....	24
II.3.2 Petit éolien classique	24
II.3.3 Petit éolien urbain	24
II.4 Comparaison entre éolienne grande et petite échelle	24
II.5 Gisement éolien en Algérie	26
Conclusion.....	26
Chapitre III étude et conception et modélisation d'éolienne	
III Introduction	28
III.1 Choisir le nombre parfait de lames	28
III.2 Caractéristique d'éolienne.....	29
III.3 Utilisation de logiciel SolidWorks pour la conception d'éolienne domestique	29
III.3.1 Conception géométrique de l'éolienne.....	30
III.3.2 Présentation générale de l'éolienne	30
III.4 Conception et réalisation géométrique des pièces de l'éolienne	30
III.5 Réalisation d'éolien.....	33

III.6 Modélisation de la configuration choisie	34
III.6.1 Logiciel Matlab	34
III.6.2 Modélisation d'une éolienne.....	34
III.6.3 Partie mécanique	34
III.6.4 Modèle de turbine.....	36
III.6.5 Partie électrique.....	38
Conclusion.....	40
Chapitre IV analyse et validation des résultats	
IV Introduction	42
IV.1 Systèmes éoliens dans les sites isolés	42
IV.2 Choix d'un petit système éolien pour l'alimentation en électricité et en eau d'une ferme agricole.....	42
IV.3 Éolienne de pompage	43
IV.4 Critères de choix d'un site éolien pour installer une petite éolienne	44
IV.4.1 Estimation des besoins en énergie	44
IV.4.2 Le potentiel éolien du site	44
IV.4.3 Analyse locale	44
IV.4.3.1 Variation de la hauteur	44
IV.4.3.2 Types de mâts.....	45
IV.4.3.3 Identifier les contraintes liées à la construction.....	45
IV.5 Étude et simulation d'un système éolien dédié au pompage d'eau	45
IV.5.1 Logiciel Homer	45
IV.5.2 Site d'implantation.....	46
IV.5.2.1 Vitesse de vent dans le site El kharrouba	46

IV.5.2.2 Consommation électrique	47
IV.5.3 Système d'éolienne.....	47
IV.5.3.1 Caractéristique de pompe immergée.....	47
IV.5.3.2 Caractéristique du système éolien.....	48
IV.5.4 Résultats énergétiques.....	48
IV.5.4.1 Production et consommation.....	48
IV.5.5 Résultats économiques.....	50
IV.6 Etude installation réseau électrique (sonelgaz).....	51
IV.7 Comparaison entre installation système éolienne et réseau électrique (sonelgaz)	51
Conclusion.....	52
Conclusion générale	53
Bibliographe	54

Nomenclatureur

P_m : Puissance mécanique du vent.	(W)
C_p (Θ, λ) : coefficient de performance fonction de λ et θ.	(-)
ρ : densité de l'air.	(Kg/m ³)
R_p : surface balayée par les pales du rotor où r est le rayon du rotor.	(m ²)
V_w : vitesse du vent.	(m/s)
λ : rapport de vitesse de pointe.	(-)
W_G : vitesse du rotor du générateur.	(rad/s)
Θ : angle de pas des pales du rotor.	(deg)
T_m : Couple sur l'arbre rapide.	(rad/s)
G : Rapport de vitesse.	(-)
T_e : Couple du générateur.	(-)
T_{loss} : Couple de perte.	(-)
V_f : la tension de sortie.	(V)
C : la constante C qui représente la tension de référence.	(-)
V : la tension de la batterie.	(V)
K_p : la constante des pertes.	(-)

Liste de figure

Fig.I.1 Schéma de noria	4
Fig.I.2 Centrale hydroélectrique	5
Fig.I.3 Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire	7
Fig.I.4 cellule photovoltaïque	8
Fig.I.5 Système Photovoltaïque	8
Fig.I.6 Énergie Biomasse	10
Fig.I.7 Une source d'énergie géothermique	11
Fig.I.8 Les bateaux à voile	12
Fig.I.9 Moulin chandelier	13
Fig.I.10 Moulin tour	13
Fig.I.11 Première éolienne créée par Charles et Brush	14
Fig.I.12 éolienne de Poul La Cour	14
Fig.I.13 éolienne Darrieus	14
Fig.I.14 éolienne Johannes Juul	14
Fig.II.1 Transformation de l'énergie du vent	17
Fig.II.2 Éolienne à axe vertical	18
Fig.II.3 Schéma de principe du rotor de Savonius	19
Fig.II.4 Schéma du rotor de Darrieus	19
Fig.II.5 Éolienne à axe horizontal	19
Fig.II.6 Types d'éoliennes à axe horizontal	20
Fig.II.7 Composants d'une éolienne à axe horizontal	20
Fig.II.8 Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale .	21
Fig.II.9 Coefficient de Puissance de différents types d'éoliennes	21
Fig.II.10 Différents types de tours	22
Fig.II.11 Petite éolienne à courant continu	23
Fig.II.12 Éolienne urbaine de deux mètres de diamètre, puissance 1,75 kW à 14 m/s	24
Fig.II.13 Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol	26

Fig.III.1 Courbes de puissances de l'éolienne	29
Fig.III.2 conception géométrique des pièces de moyeu.....	30
Fig.III.3 Assemblage de moyeu	31
Fig.III.4 conception géométrique de pièces de pale.....	31
Fig.III.5 conception géométrique de pièces de multiplicateur de vitesse	31
Fig.III.6 conception géométrique de pièces d'axe d'éolienne	31
Fig.III.7 conception géométrique de pièces d'alternateur.....	32
Fig.III.8 conception géométrique de pièces de girouette d'orientation	32
Fig.III.9 Assemblage générale d'éolienne	32
Fig.III.10. Réalisation d'éolienne.....	33
Fig.III.11 Profil de vitesse du vent.....	34
Fig.III.12 La caractéristique du coefficient de puissance	35
Fig.III.13 Modèle d'éolienne	36
Fig.III.14 Modèle d'éolien global	37
Fig.III.15 Modèle d'éolien global	37
Fig.III.16 Modèle d'alternateur.....	38
Fig.III.17 Modèle de régulateur de tension.....	38
Fig.III.18 Données de sortie du générateur.....	39
Fig.III.19 système d'éolien.....	40
Fig.IV.1 Une petite éolienne à axe horizontal pour un site isolé « Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau »	42
Fig.IV.2 Schéma d'une éolienne à axe horizontal	43
Fig.IV.3 Schéma d'une éolienne de pompage	44
Fig.IV.4 L'effet de différent choix d'emplacement d'une éolienne sur le vent capté.....	45
Fig.IV.5 Site implantation (global Wind atlas)	46
Fig.IV.6 Schéma vitesse de vent (la vitesse moyenne 8.7m/s)	46
Fig.IV.7 Schème de consommation électrique	47
Fig.IV.8 Schème du système éolien	47

Fig.IV.9 TROTEC Pompe de puits TDP 370 E	47
Fig.IV.10 Énergie produite chaque mois par éolienne.....	48
Fig.IV.11 Puissance produite par éolienne (jour /Anne)	49
Fig.IV.12 Puissance convertie par convertisseur (jour /Anne)	49
Fig.IV.13 Puissance chargée par batterie (jour /Anne).....	50
Fig.IV.14 le coût de l'installation éolienne.....	50

Liste des tableaux

Tableau.II.1 Taille des éoliennes	18
Tableau.II.2 Avantage et inconvénient d'éolienne grand et petit échelle.....	25
Tableau.III.1 Caractéristique d'éolienne	29
Tableau.III.2 Simulation des paramètres de la pièce mécanique.....	37
Tableau.III.3 Simulation des paramètres de la partie électrique.....	39
Tableau.IV.1 Caractéristique du système éolien	48
Tableau.IV.2 montre la quantité d'énergie production et consommation chaque année par les éoliennes.....	48
Tableau.IV.3 montre le coût de l'installation éolienne et le coût de chaque composante de la première année à 25 ans	50
Tableau.IV.4 Etude installation réseau électrique (sonelgaz).....	51
Tableau.IV.5 comparaison économique de deux système	51

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des énergies exploitées par l'homme, de telle manière que leurs réserves ne s'épuisent pas, en d'autres termes sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

Dans le secteur de l'énergie électrique, le monde entier cherche à réduire considérablement sa dépendance aux énergies de source fossile, se caractérisant à la fois par une forte émission de gaz à effet de serre et par des prix instables.

Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse.

L'approvisionnement en eau est l'un des problèmes majeurs des temps modernes, que ce soit pour la consommation humaine (personnes) ou pour les agriculteurs (bétail et irrigation). Ce problème est directement lié à un autre problème, qui est de fournir l'énergie nécessaire. Malgré les efforts considérables de SONELGAZ, de nombreuses régions en Algérie restent inconnectées au réseau public d'électricité. Les régions désertiques, par exemple, sont éloignées des villes. Les agriculteurs sont confrontés à un grave problème en raison de la pénurie d'eau. Mais il n'y a pas l'énergie nécessaire ou elle est trop coûteuse à obtenir.

L'énergie éolienne est un bon choix pour la génération d'énergie électrique, puisque l'énergie éolienne est directement convertie en énergie électrique par les éoliennes (aérogénérateurs).

Les éoliennes domestiques apparaissent comme une machine appropriée dans les milieux urbains et les sites isolés pour l'approvisionnement des appareils électriques, l'extraction de l'eau, la production de l'électricité... etc.

Les chapitres suivants sont inclus dans notre travail :

- Dans le premier chapitre, nous discuterons un petit tour sur l'historique du développement des différents types d'énergies renouvelables dans le monde et les principes de leur fonctionnement, notamment l'histoire du développement de l'énergie éolienne.
- Dans deuxième chapitre on a parlé sur l'énergie éolienne principe de fonctionnement et type d'éolienne, comparaison entre éolien grand et petite échelle avec un gisement de vent pour quelque zone en Algérie.
- Le troisième chapitre porte sur le choix du modèle de l'éolien axe horizontal à dessiner et à concevoir, l'esquisse de tous les composants, l'assemblage sous le logiciel industriel SOLIDWORKS 2014 ainsi que la modélisation du système par logiciel Matlab.

- Le dernier chapitre de cette recherche on utilise le logiciel Homer, Nous avons présenté et analysé les résultats de la simulation modale éolienne, mettant en évidence et comparant les résultats énergétiques et économiques du système éolien et du réseau électrique (sonal gaz).

Le document est finalisé par une conclusion générale.

Chapitre I
Généralités et état de l'art sur
l'énergie renouvelable

I Introduction

La capacité d'un corps à produire un travail est connue sous le nom d'énergie. Les sources d'énergies utilisables par l'homme sont nombreuses : elles lui fournissent la chaleur, la lumière et la force. De tout temps, l'énergie a été essentielle à l'existence humaine et son emploi sous des formes diverses a continuellement transformé la société. Dans ce chapitre, nous détaillerons principalement les inventions et découvertes liées aux sources d'énergie renouvelable depuis l'Antiquité jusqu'au jour d'aujourd'hui.

I.1 L'énergie hydraulique

I.1.1 Historique de l'énergie hydraulique

Dans l'Antiquité les hommes n'avaient pas beaucoup d'intérêt pour l'énergie hydraulique. Le climat méditerranéen ne s'adapte pas facilement, car il est peu courant de trouver des cours d'eau avec un débit constant et l'utilisation d'aqueducs est une option très coûteuse. La noria était la principale machine à utiliser le courant comme source d'énergie pendant l'Antiquité. C'est une grande roue à ailettes qui se trouve sur un cours d'eau et est actionnée par le courant. L'eau est élevée et déversée dans un aqueduc adjacent qui la distribue par un chapelet de godets fixés à cette roue. La noria serait apparue pour la première fois chez les Romains au Ier siècle avant Jésus-Christ.

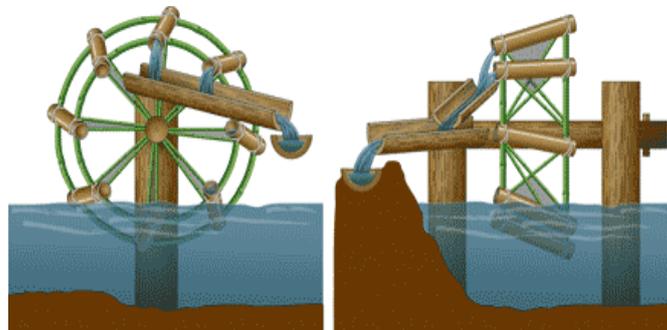


Fig.I.1 Schéma de noria [1]

Les Grecs ont construit les premiers moulins à eau vers 300 et 250 avant Jésus-Christ. Ils avaient une roue motrice horizontale plongée dans le courant d'eau. L'arbre de la roue s'étendait verticalement en hauteur, traversait la meule dormante et entraînait la meule courante placée au-dessus. Jusqu'à la fin du Moyen Âge, ce type de moulin de petite taille était utilisé dans toute l'Europe [1].

Les roues à aubes n'ont été utilisées pour produire de l'électricité qu'au XIXe siècle. À la fin du siècle, la roue hydraulique sera remplacée par la turbine et les premiers barrages seront construits.

En effet Benoist de Fourneyron (1802-1867) crée la première turbine au XIXe siècle. Il utilise la pression pour faire fonctionner une roue à eau. En 1827 une première turbine est installée aux forges de Pont-sur-l'Ognon en Franche-Comté. La hauteur de chute de 1,4 m produit une puissance de 4,5 kW avec une fréquence de 60 tours par minute. Quelques années après, en 1837, en Allemagne, il a une turbine de 55 cm de diamètre et une puissance de 45 kW pour une vitesse de rotation de 2300 tours par minute sur une chute de 112 mètres.

Par la suite, les dynamos et les alternateurs inventés par le Belge Zénobe Gramme (1826-1901) entre 1869 et 1877 ont été créés pour produire de l'électricité de manière industrielle et pour la transporter sur de longues distances [2].

I.1.2 Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

Les centrales hydroélectriques transforment l'énergie en mouvement de l'eau en énergie électrique. Une turbine hydraulique transforme d'abord l'énergie de la chute d'une masse d'eau en énergie mécanique. Cette turbine crée un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [3].

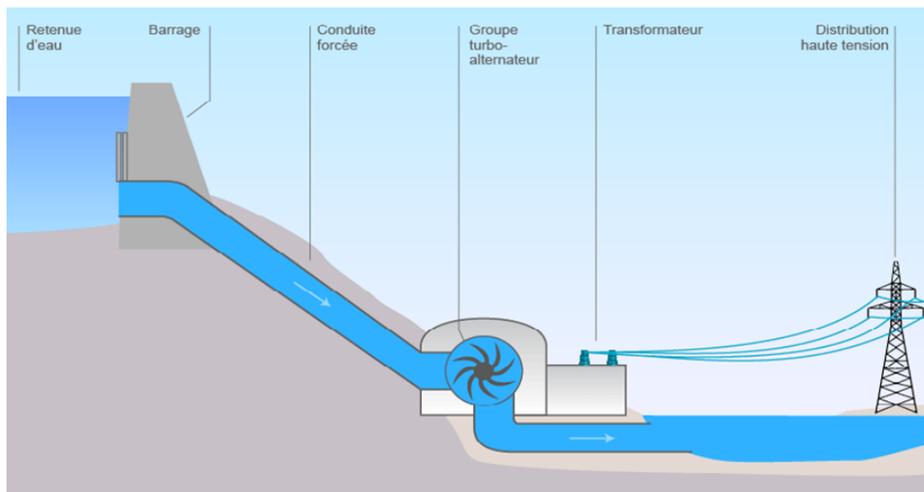


Fig.I.2 Centrale hydroélectrique [3]

Avantages

- Souplesse d'utilisation.
- Absence d'émissions de CO₂.
- Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.
- Pompage durant les heures creuses afin de reconstituer la réserve d'eau dans le bassin de retenue.
- Démarrage et arrêt des centrales très rapides.
- Production d'électricité décentralisée (pas de pertes liées aux transports).

- Facilité d'entretien et la faible usure du matériel qui travaille à vitesse et à température modérées.
- Haut niveau de rendement des machines, capables de transformer 90 % de l'énergie de l'eau en énergie mécanique [4].

Inconvénients

- Contrainte géographique.
- Impacts sur l'environnement à la construction.
- L'inondation de certains reliefs lors de la construction de barrages.
- Modification du débit et du niveau de l'eau.
- Perturbation de la faune et de la flore.
- Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons [3], [4].

I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est disponible en quantité constante chaque année partout sur la planète. Par rapport aux autres formes d'énergie, elle semble avoir un avenir prometteur et présente un bon rendement grâce à la technologie actuelle [5].

Il y a deux manières de transformer l'énergie solaire : Thermique et Photovoltaïque.

I.2.1 L'énergie solaire thermique**I.2.1.1 Historique de l'énergie thermique**

Edward Morse a breveté un système appelé "mur capteur" en 1881 pour chauffer l'air. Sa fonction consiste à retenir la chaleur à l'extérieur pendant la journée et à la restituer vers l'intérieur pendant la nuit. Une vitre est ajoutée pour créer un effet de serre. Félix Trombe a créé cette notion dans les années 1960 et l'a appelée « mur Trombe » ou « mur Trombe-Michel ». Les panneaux solaires aérothermiques ont été créés dans les années 1970 et utilisent un système de chauffage par effet de serre entre deux parois, avant d'être introduits à l'intérieur de la maison. Hoyt C. Hottel et A. Whillier ont développé dans les années 1950 le modèle le plus courant de capteurs solaires actuels pour chauffer l'eau et l'air [6].

I.2.1.2 Principe du fonctionnement de l'énergie thermique

L'énergie solaire thermique est définie comme l'énergie produite par des capteurs solaires thermiques vitrés qui utilisent la lumière du soleil pour chauffer directement l'eau et les locaux. La chaleur des panneaux est transférée à un fluide caloporteur.

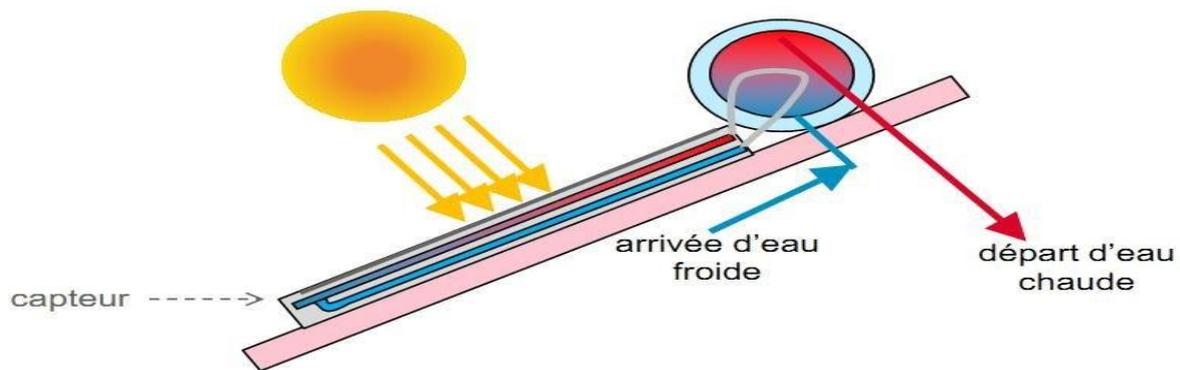


Fig.I.3 Principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire [7]

Avantages

- Rendement élevé (jusqu'à 80 %).
- Source d'énergie inépuisable.
- Gros potentiel de développement.

Inconvénients

- Généralement limité au chauffage de l'eau chaude sanitaire.
- Énergie coûteuse par rapport au chauffage par énergie fossile à cause d'investissements assez lourds.
- Retour sur investissement assez long (en moyenne 10 à 15 ans).
- Certains panneaux sont très sensibles et peuvent être endommagés par certaines conditions météorologiques (grêle, gel...) [4].

I.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque

I.2.2.1 Historique de photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois par Edmond Becquerel un physicien français en 1839 et les mécanismes ont été expliqués par Einstein en 1912, mais cela a été une curiosité scientifique de laboratoire jusqu'aux années 50. Becquerel a découvert que certains matériaux produisent une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

Heinrich Hertz a étudié l'effet dans des solides comme le sélénium dès les années 1870. Le sélénium a rapidement été utilisé par les photographes comme luxmètre avec des rendements d'environ 1 %.

Dès les années 1950, les équipes des Laboratoires Bell ont fait de rapides progrès en fabriquant la première cellule au silicium cristallin avec un rendement de 4 % en utilisant le procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs a joué un rôle important dans le développement des cellules solaires [8].



Fig.I.4 cellule photovoltaïque [6]

I.2.2.2 Principe du fonctionnement de photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est produite directement en convertissant les photons du rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise des modules photovoltaïques constitués de cellules ou de photopiles fabriquées à partir de matériaux sensibles aux longueurs d'onde du rayonnement. Un point de puissance maximal (PPM) est présenté par un générateur photovoltaïque (GPV) obtenu en combinant plusieurs cellules photovoltaïques en série ou en parallèle. Il présente également une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire. Le niveau de rayonnement et la température de la cellule, ainsi que le vieillissement général, déterminent cette caractéristique [9].

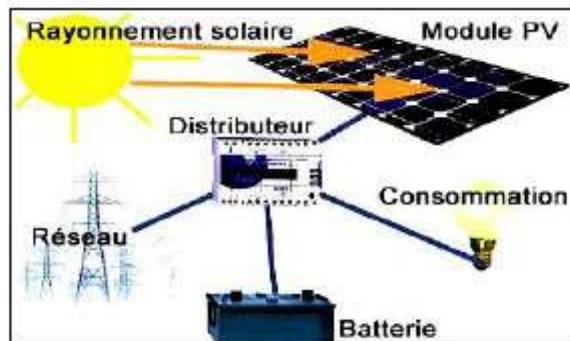


Fig.I.5 Système Photovoltaïque [10]

Avantage

- une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. Il ne nécessite ni le combustible, ni le transport, ni un personnel hautement spécialisé.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes [11].

Inconvénients

- une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28 %. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant, la production d'électricité n'est pas constante [12].

I.3 L'énergie de la biomasse**I.3.1 Historique de la biomasse**

L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie lumineuse et thermique remonte à la Préhistoire, lorsque les gens utilisaient du bois pour se chauffer et s'éclairer. Jusqu'à la découverte du charbon et d'autres énergies fossiles, c'était la première source d'énergie exploitée pendant des millénaires.

À la fin du XIXe siècle, lorsque l'industrie automobile a commencé à se développer, les conducteurs ont commencé à utiliser des carburants qui n'étaient pas encore connus sous le nom de biocarburants. Le moteur à combustion interne a été créé par Nikolaus Otto et était destiné à fonctionner avec de l'éthanol. Le créateur du moteur nommé Rudolf Diesel utilisait de l'huile d'arachide pour alimenter ses appareils. La Ford T, qui a été fabriquée entre 1903 et 1926, utilisait de l'alcool pour rouler [6].

I.3.2 Principe du fonctionnement de la biomasse

La biomasse est la partie biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique de l'agriculture, de l'élevage, de la pêche et de l'aquaculture, ainsi que des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- Le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie lors de la fermentation des déchets.
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans tous les deux cas, les centrales thermiques peuvent produire de l'énergie thermique.

Il est intéressant de noter que la repousse des plantes est la principale source de biomasse et que le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère lors de l'incinération de la biomasse ou du méthane est compensé par celui absorbé par la biomasse. Cela signifie que le bilan carbone peut être presque zéro [13].

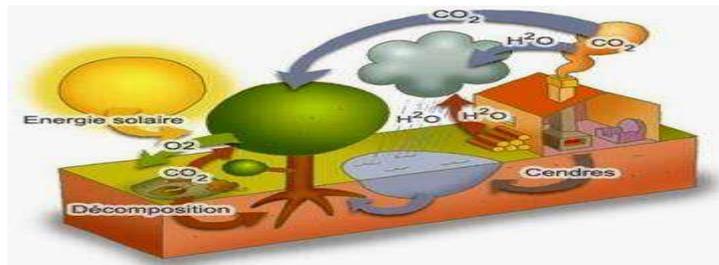


Fig.I.6 Énergie Biomasse [13]

Avantages

- Valorisation de déchets organiques.
- Diminution du volume de matière organique et désodorisation des déchets.
- Valorisation des ressources locales (élevages agricoles...).

Inconvénients

- Épuisement des stocks.
- Génératrice de CO₂.
- Rendement parfois faible [4].

I.4 L'énergie de la géothermie

I.4.1 Historique de la géothermie

Au moins depuis le Paléolithique, les sources d'eau chaude sont utilisées pour le bain. Le bassin en pierre sur le mont Li dans le Shaanxi en Chine est le plus ancien spa connu. Il a été construit par la dynastie Qin au III^e siècle av. J.-C., à l'emplacement même où le palais Huaqing Chi (en) a été construit plus tard. Au premier siècle de notre ère, les Romains ont conquis Aquae Sulis, aujourd'hui Bath, dans le Somerset, en Angleterre, et ont utilisé les sources chaudes de cette région pour alimenter leurs thermes et chauffages par le sol. Il est possible que les frais d'accès de ces bains soient la première utilisation commerciale de l'énergie géothermique. Situé à Chaudes-Aigues, en France, le plus ancien réseau de chauffage urbain géothermique du monde existe depuis le XV^e siècle. En 1827, la première exploitation industrielle a commencé à Larderello, en Italie, en utilisant la vapeur des geysers pour extraire l'acide borique des volcans de boue.

Au XX^e siècle, l'énergie géothermique est envisagée comme source de production en raison de la demande d'électricité croissante. Le 4 juillet 1904, Piero Ginori Conti réalise une étude sur le premier dispositif de production d'énergie géothermique à Larderello. Il parvient à allumer quatre bougies. Plus tard, la première centrale géothermique commerciale du monde est érigée à cet endroit en 1911.

Jusqu'à ce que la Nouvelle-Zélande construise une centrale en 1958, il était le seul producteur industriel d'électricité géothermique au monde.

La première centrale électrique à cycle combiné a été mise en œuvre en 1967 dans l'URSS. Cette technologie permet de produire de l'électricité à partir de ressources à des températures beaucoup plus basses qu'auparavant. En 2006, une centrale à cycle binaire a été mise en service à Chena Hot Springs, en Alaska, produisant de l'électricité à partir d'une température de fluide record de 57 °C [14].

I.4.2 Principe du fonctionnement de géothermique

Le terme "géothermie", dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, fait référence aux méthodes pour capter l'énergie thermique de l'intérieur du globe terrestre et l'utiliser comme source de chaleur ou pour la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques. Un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la Terre pour capter l'énergie géothermique. Ce fluide peut provenir d'une nappe captive naturelle, d'eau injectée dans une roche chaude qui ne peut pas être percée ou de puits spéciaux. En tout cas, le liquide se réchauffe et monte à une température plus élevée [13].

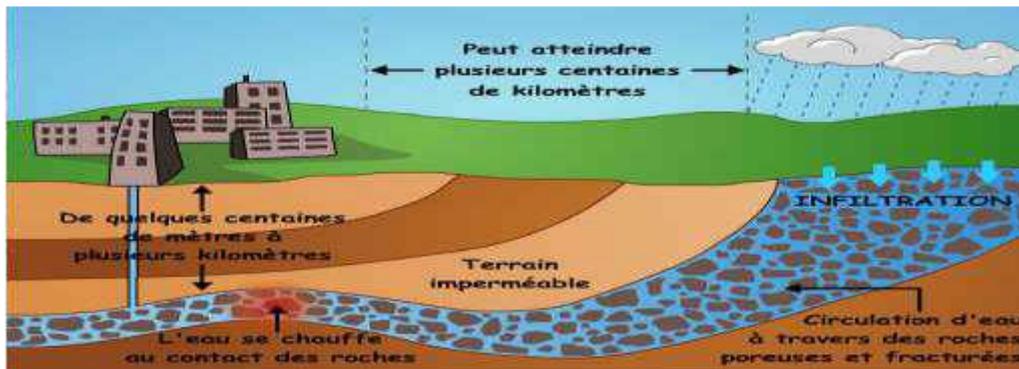


Fig.I.7 Une source d'énergie géothermique [13]

Avantages

- Absence de déchets après utilisation.
- Non-dépendance des conditions atmosphériques.
- Pas besoin de stockage.
- Utilisation continue.

Inconvénients

- Coût élevé.
- Affaissements de terrain.
- Rentabilité obtenue qu'après 5 ans de son utilisation [4].

I.5 L'énergie éolienne

I.5.1 Historique d'éolienne

I.5.1.1 Les bateaux à voile

Au Moyen Âge, la seule utilisation de l'énergie éolienne était pour propulser les navires. Les premières traces des navires à voile en papyrus ou en coton sont visibles en Egypte.

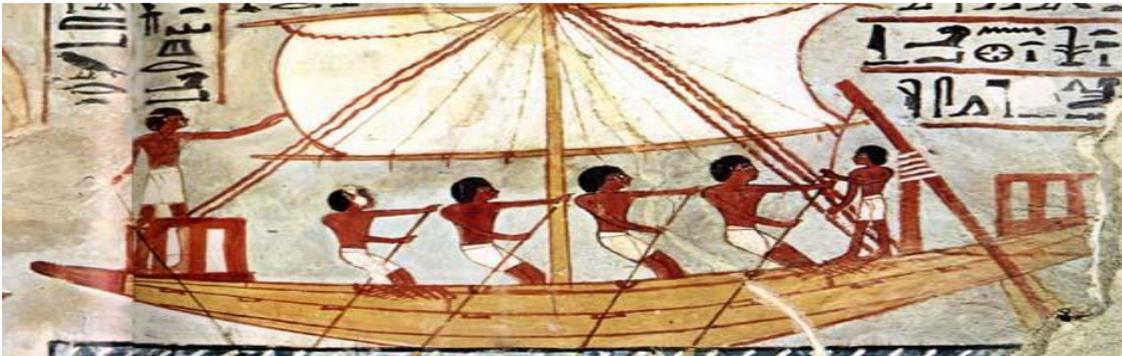


Fig.I.8 Les bateaux à voile [6]

I.5.1.2 Les moulins à vent

Le moulin à vent n'apparaît en Perse qu'au VIIe siècle après Jésus-Christ. Il est composé d'un axe vertical et de pales qui sont confinées verticalement à l'intérieur de la structure du moulin. Les parois du moulin ont des orifices qui permettent à l'air de pénétrer pour activer l'éolienne. La meule courante était directement reliée à l'arbre vertical, sans transmission. Il était utilisé pour irriguer les terres cultivées et écraser du grain [6].

I.5.1.3 Le Moyen Âge

Puisque la plupart des sociétés antiques recouraient abondamment aux esclaves, les ingénieurs se sont peu souciés d'alléger le travail des hommes avec des machines pendant toute l'Antiquité. Cependant, les pays occidentaux au Moyen Âge n'ont plus accès à cette main-d'œuvre gratuite. Il est envisagé d'utiliser au mieux les énergies qui ne dépendent plus uniquement des muscles humains en créant des machines utilisant des sources d'énergie que les hommes de l'Antiquité avaient ignorées, telles que l'eau et le vent. L'homme a peu à peu utilisé ces forces naturelles pour accomplir ses tâches quotidiennes en observant la nature et sans comprendre réellement les grands principes scientifiques [6].

À la fin du IXe siècle, les premiers moulins à vent ont été signalés en Europe en Angleterre. Cependant, ils n'ont commencé à se propager dans toute l'Europe qu'à partir du XIIe siècle, en premier lieu sur les côtes du Nord, puis dans les pays bordant l'Atlantique (Portugal, Espagne, France). En général, ils sont placés sur des petits tertres et éminences, soit isolés, soit groupés, et ont un axe horizontal fixe [6].

Cependant, deux problèmes techniques se présentent :

En premier lieu, les ailes du moulin doivent toujours être exposées au vent, ce qui constitue une contrainte importante : le vent est capricieux et change régulièrement de direction, contrairement aux rivières dont le courant est toujours dans la même direction. Ensuite, le meunier doit être capable de changer le mouvement de rotation vertical des ailes pour actionner la meule dans un mouvement de rotation horizontal.

En utilisant une série d'engrenages pour relier la meule aux ailes, ce dernier problème sera résolu. En ce qui concerne les problèmes d'orientation par rapport au vent, les charpentiers médiévaux ont créé des moulins qui pivotent entièrement sur un grand trépied en bois. Au départ, le meunier l'a manipulé manuellement, mais il sera ensuite équipé d'un gouvernail qui fonctionne automatiquement grâce à une petite roue à pales qui se déplace par le vent. C'est un moulin à chandelier [6].



Fig.I.9 Moulin chandelier [6]



Fig.I.10 Moulin tour [6]

Par la suite, seul le toit tournera en fonction de la direction du vent, à partir d'une tour immobile appelée le moulin-tour.

Pendant des siècles, l'eau et le vent continueront d'être les principales sources d'énergie, et les techniques hydrauliques, en particulier, seront soumises à des recherches et à des améliorations continues.

I.5.1.4 L'éolien

Les premières éoliennes aux États-Unis ont été construites au XIXe siècle pour le pompage de l'eau. Ils sont constitués d'un pylône avec un axe horizontal autour duquel plusieurs pales sont fixées.

Grâce à un système de bielle-manivelle, le mouvement de rotation des pales est transformé en mouvement de va-et-vient, ce qui permet au piston d'aspirer l'eau.

Charles F. Brush construit la première éolienne aux États-Unis entre 1887 et 1888. Cette éolienne de 12 kW a alimenté sa maison en électricité pendant 20 ans [6].

Le rotor de l'éolienne avait un diamètre de 17 m et était composé de 144 pales.

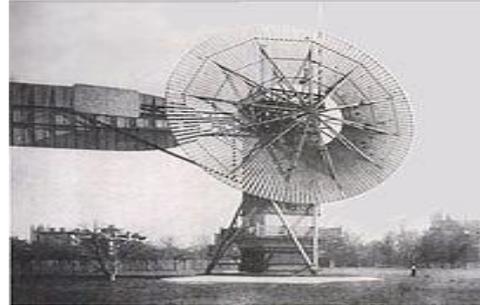


Fig.I.11 Première éolienne créée par Charles et Brush [6]

En 1891, Poul La Cour (1846-1908), un Danois, crée une éolienne plus performante capable de produire 25 kW avec des rotors à 4 pales. Il souligne que les turbines à rotation rapide avec moins de pales ont un meilleur rendement.

La première éolienne à l'échelle industrielle est cette éolienne [6].



Fig.I.12 éolienne de Poul La Cour [6]

Les éoliennes vont se développer progressivement au XXe siècle. En 1920, Georges Darrieus (1888-1979) concevait une éolienne avec un axe vertical [6].



Fig.I.13 éolienne Darrieus [6]

Johannes Juul (1887-1969) invente la turbine Gedser en 1957, qui a servi de modèle aux éoliennes modernes. Ce type de turbine permettait à des éoliennes de produire jusqu'à 1000 kW.

La grande consommation d'énergies fossiles telles que le pétrole et le charbon retardera le développement des éoliennes [6].



Fig.I.14 éolienne Johannes Juul [6]

La production de puissance à partir de l'énergie éolienne, s'est avivée après la crise énergétique de 1973 le moteur principal du développement des éoliennes, l'éolienne moderne commença à être développée au début des années 1980.

Depuis la technologie n'a cessé de s'améliorer de nombreuses recherches sont actuellement en cours pour permettre à l'énergie éolienne de pouvoir jouer le rôle qui l'attend dans les prochaines années.

Conclusion

Dans ce chapitre, les énergies renouvelables sont présentées, avec une brève explication de leur concept de production d'électricité dans les différentes centrales.

Les énergies renouvelables, quant à elles, sont des énergies inépuisables, propres qui peuvent répondre aux besoins énergétiques.

Dans le second chapitre, on s'intéressera à l'énergie éolienne.

Chapitre II

L'énergie Eolienne

II Introduction

Une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans les sites assez bien ventés est l'utilisation de systèmes éoliens. De tels systèmes sont fiables et flexibles, ce qui leur confère plusieurs avantages.

Nous donnerons des notions sur les éoliennes en général, le développement des éoliennes et leur application par les humains, nous discuterons des différents types d'éoliennes et nous expliquerons les divers domaines d'application des éoliennes.

II.1 Principe de fonctionnement

Les turbines éoliennes doivent avoir une partie mécanique et une partie électrique pour convertir l'énergie du vent en énergie électrique. La partie mécanique capte et transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique rotative. La génératrice électrique est alimentée par un système d'entraînement, généralement constitué d'une boîte de vitesse. La génératrice électrique transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [15].

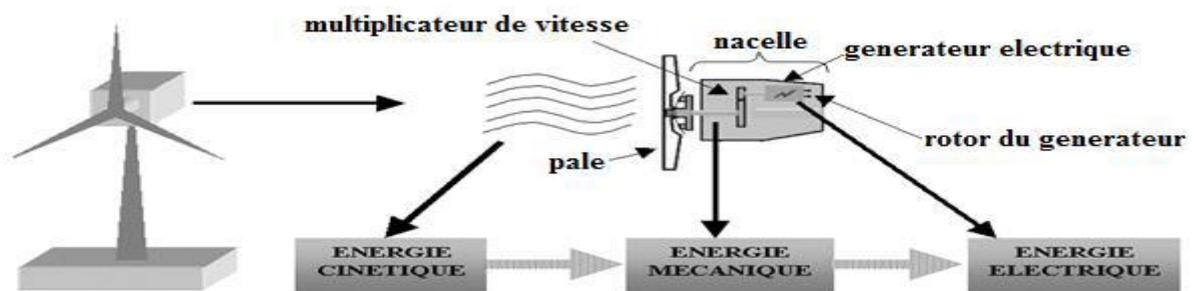


Fig.II.1 Transformation de l'énergie du vent [16]

Le système de conversion éolienne est principalement constitué par :

- Une turbine éolienne avec ses annexes mécaniques dont le rôle est de convertir une partie de l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Un générateur électrique qui transforme une partie de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre en énergie électrique.
- Une charge électrique qui peut être statique ou dynamique, ou un réseau de distribution d'énergie électrique.
- Une interface d'électronique de puissance, qui est en général placée entre le générateur et la charge, qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qui exige la charge.
- Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire, et éventuellement en régime dynamique [17].

II.1.1 Classement des éoliennes

Dans cette section, nous présentons les différentes éoliennes rencontrées dans la production d'énergie électrique, pour les classer en différentes catégories :

II.1.2 Taille des aérogénérateurs

Les chercheurs et les constructeurs fabriquent des éoliennes de plus en plus puissantes en raison du besoin d'énergie électrique.

Les éoliennes peuvent être classées en trois catégories : les éoliennes de petite, de moyenne et de grande taille [18].

Tableau.II.1 Taille des éoliennes [18]

Dénomination	Diamètre du rotor (m)	Aire balayée (m ²)	Puissance (kW)
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.25
Mini	1.25-3	1.2-7.1	1.5
Domestique	3-10	7-79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000

II.2 Les éoliennes se divisent en deux grandes familles

II.2.1 Éoliennes à axe vertical (VAWT)

Ce type d'éoliennes ne peut pas démarrer tout seul, il faut donc un système de lancement. Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ce qui signifie qu'il n'est pas nécessaire de construire une tour comme indiqué par la Fig.II.2 [19].



Éolienne de type Darrieus

Éolienne de type Savonius

Fig.II.2 Éolienne à axe vertical [19]

➤ Le rotor de Savonius: dont le principe de fonctionnement est basé sur la traînée différentielle. Chaque face d'un corps creux reçoit des forces de vent de différentes intensités (Fig.II.3) [20]. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

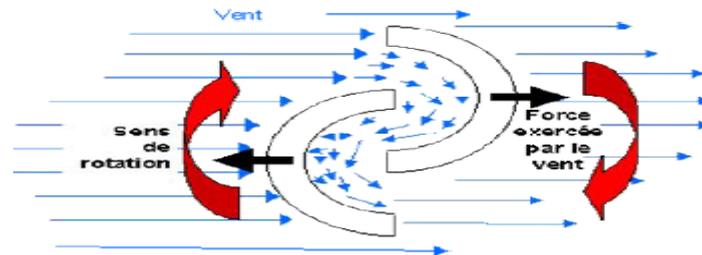


Fig.II.3 Schéma de principe du rotor de Savonius [20]

➤ Le rotor de Darrieus: est basé sur le principe de variation d'incidence cyclique. Un profil est soumis à des forces d'intensités et de directions variables lorsqu'il est placé sous différents angles dans un écoulement d'air. Ces forces produisent un couple moteur qui entraîne la rotation du dispositif (Fig.II.4).

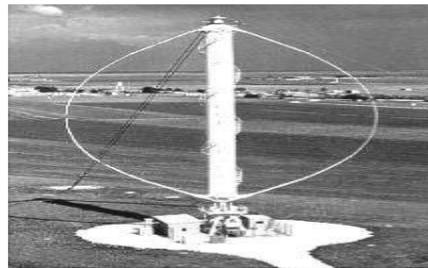


Fig.II.4 Schéma du rotor de Darrieus [21]

II.2.2 Éoliennes à axe horizontal (HAWT)

Aujourd'hui, toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau ont un rotor de type hélice monté sur un axe horizontal (c'est-à-dire un arbre principal horizontal). Leur rendement exceptionnel est leur principal avantage [22], [23].



Fig.II.5 Éolienne à axe horizontal [24]

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal (Fig.II.6):

- Amont : le vent souffle en direction de la nacelle sur le devant des pales. Un dispositif oriente le rotor dans la direction du vent et les pales sont rigides.
- Aval : le vent frappe l'arrière des pales depuis la nacelle. Le rotor est flexible et peut être orienté automatiquement. La disposition turbine en amont est la plus couramment utilisée, car elle est plus simple et offre de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, moins d'efforts de manœuvre et plus de stabilité. Les pales d'éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées dans la direction du vent. Pour cela, la nacelle est orientée en fonction de cette direction.

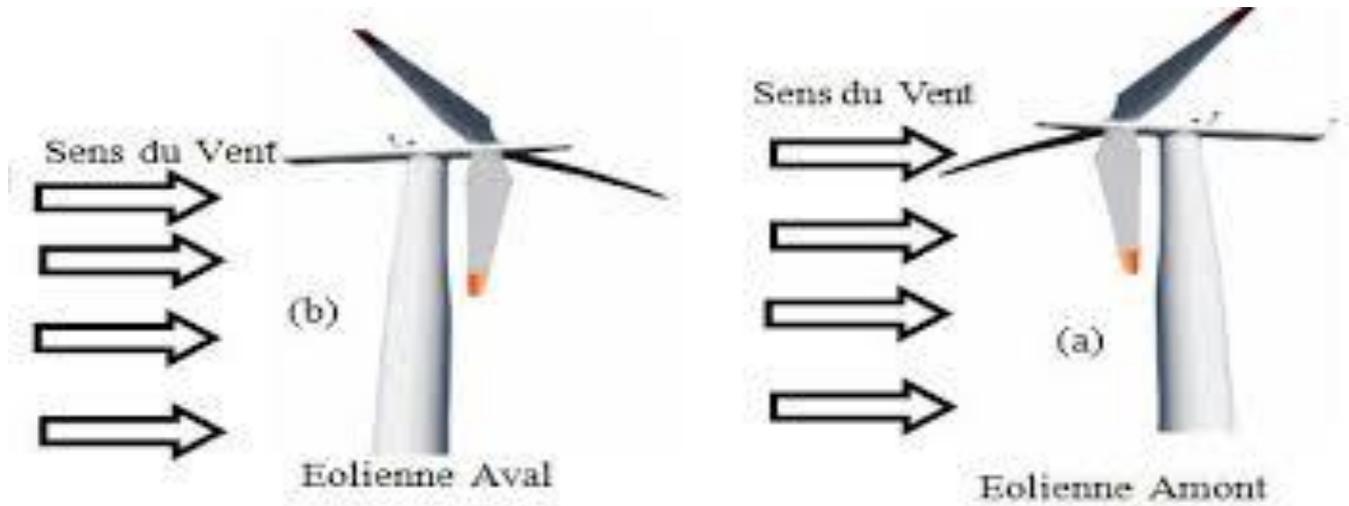


Fig.II.6 Types d'éoliennes à axe horizontal [25]

II.2.3 Principaux composants d'une éolienne horizontale

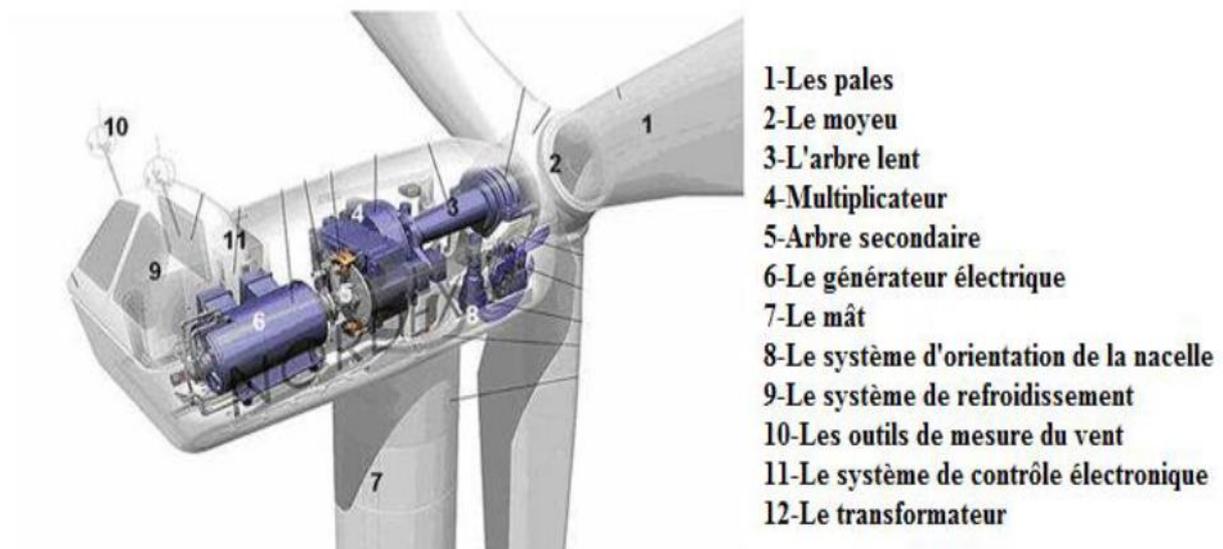


Fig.II.7 Composants d'une éolienne à axe horizontal [26]

- **Les pales** : les capteurs d'énergie cinétique qui transfèrent l'énergie au rotor.

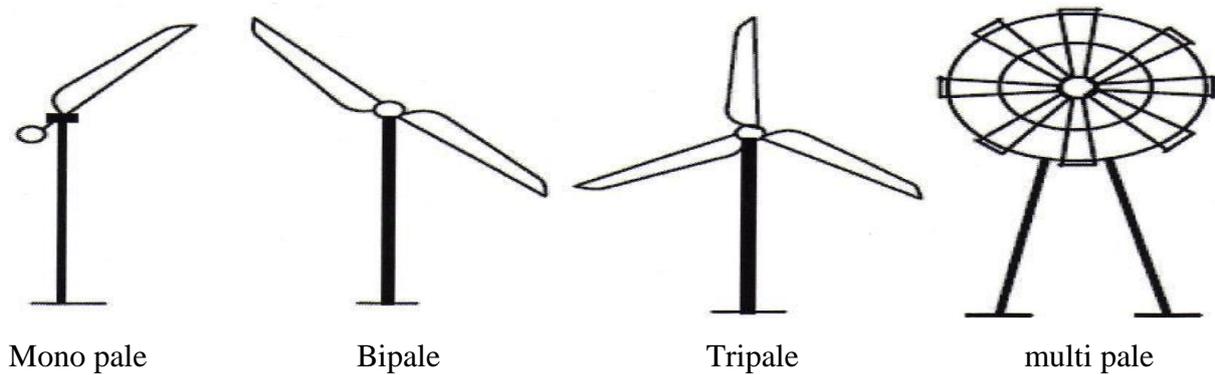


Fig.II.8 Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale [27]

- Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrages proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible, car leur vitesse en bout de pale est limitée.

- En règle générale, les éoliennes à marche rapide sont constituées de deux pales ou de trois pales. Bien que la roue bipale soit la plus économique et la plus simple, elle produit des vibrations importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, ce qui réduit la fatigue et le bruit, mais elle est plus complexe et plus lourde [28].

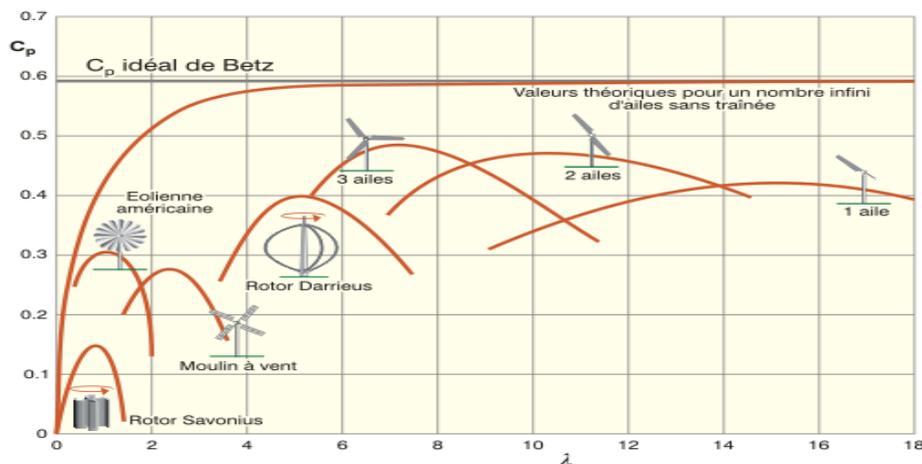


Fig.II.9 Coefficient de Puissance de différents types d'éoliennes [29]

-**Le moyeu** : il dispose d'un système qui permet d'ajuster la vitesse de rotation en ajustant les pales.

-**L'arbre primaire (ou arbre lent)**: il est utilisé pour connecter les pales au multiplicateur.

-**Multiplicateur** : augmente la vitesse et réduit le couple. Il se trouve entre les arbres primaires et secondaires.

- **Arbre secondaire** : fournit au générateur l'énergie mécanique. Il dispose d'un frein à disque mécanique qui réduit la vitesse du vent.

- **Le générateur électrique** : il assure la production d'énergie. Il peut atteindre des mégawatts de puissance.

- **Le mât ou la tour** : il s'agit d'un tube en acier. Il a une hauteur significative : plus la hauteur est élevée, plus la vitesse du vent est élevée et vice versa, ce qui augmente le coût de la structure. La taille du mât est généralement légèrement plus grande que le diamètre des pales [30].

Il existe trois grands types de tour :

➤ Tour mât haubané : de construction simple et moins coûteuse mais principalement destinée aux machines à faible puissance. En général, pour une intervention au niveau de la nacelle, il est nécessaire de coucher le mât.

➤ Tour en treillis : il est le moins cher, mais il est souvent mal compris et peu utilisé. Son principal avantage est sa facilité de construction, ce qui la rend attrayante pour les nations en développement. Son aspect inesthétique devient un handicap certain pour les machines de grande taille.

➤ Tour tubulaire : est beaucoup plus élégante, mais le coût d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané.

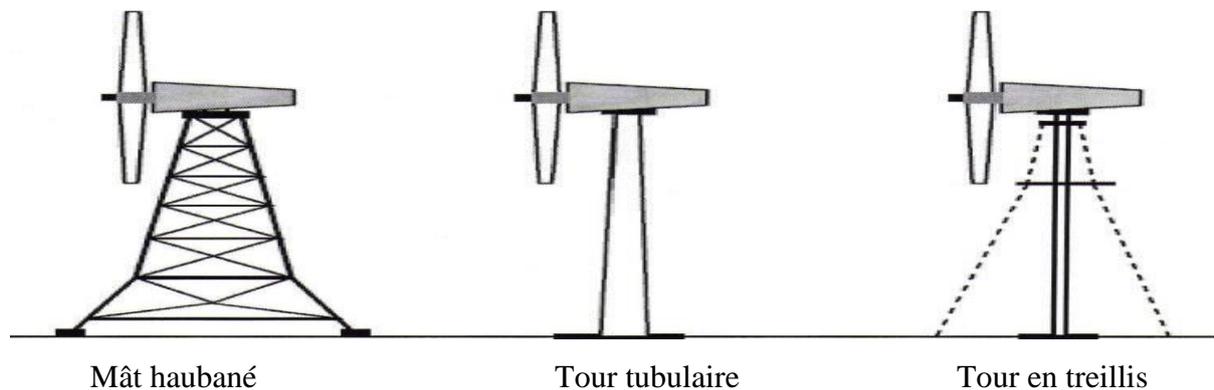


Fig.II.10 Différents types de tours [27]

- **le système d'orientation de la nacelle** : il s'agit d'une couronne dentée avec un moteur qui peut diriger l'éolienne et la bloquer dans l'axe du vent en freinant.

- **Le système de refroidissement** : l'eau ou l'huile sont utilisées comme multiplicateur et générateur.

- **Les outils de mesure du vent** : anémomètre pour mesurer la vitesse et girouette pour déterminer la direction. Les informations sont transmises au poste de commande.

- **Le système de contrôle électronique** : il supervise le fonctionnement de l'éolienne et son système de navigation.

- Un transformateur est situé au pied du mât [31].

Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.
- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne des émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine Thermique [32].
- Associable à des panneaux PV afin d'optimiser la fourniture d'électricité [33].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin de plus fort taux de croissance [34].
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [35].

Inconvénients

- Le vent peut parfois souffler à des intensités irrégulières.
- Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région.
- La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie [36].

II.3 Les éoliennes à petite échelle

Les petites éoliennes, également appelées éoliennes individuelles ou domestiques, sont celles qui ont une puissance nominale inférieure ou égale à 30 kilowatts en Europe, 36 kilowatts en France ou 100 kilowatts aux États-Unis, et qui sont soit raccordées au réseau électrique, soit autonomes en site isolé. Il a pour but de fournir une alimentation durable aux appareils électriques tels que les pompes, l'éclairage, le chauffage et les pompes, principalement dans les zones rurales ou sur des véhicules tels que les voiliers, les péniches et les caravanes. Il est fréquemment accompagné d'un module solaire photovoltaïque et d'un parc de batteries. Ce type d'équipement peut permettre l'autonomie énergétique d'un voilier (éclairage, instruments de bord...) ou d'une caravane [37].



Fig.II.11 Petite éolienne à courant continu [37]

II.3.1 Conception

Les pales éoliennes à petite échelle ont généralement un diamètre de 1,5 à 3,5 mètres (4 pieds 11 pouces à 11 pieds 6 pouces) et produisent de 0,5 à 10 kW à leur vitesse de vent idéale. Bien que les éoliennes à axe vertical (VAWT) ne transforment pas le vent en électricité, elles peuvent présenter des avantages en termes de placement et de maintenance. La plupart des petites éoliennes sont des éoliennes à axe horizontal. Le rapport de vitesse de pointe (le rapport de la vitesse de pointe de la pale à la vitesse du vent) et le rapport portance/trainée doivent être maintenus à des niveaux optimaux pour maximiser l'efficacité [38].

II.3.2 Petit éolien classique

Les petites éoliennes traditionnelles sont généralement conçues avec un "axe horizontal" et ont généralement deux à trois pales pour une puissance électrique allant de 1 kW à 36 kW (en France) [37].

II.3.3 Petit éolien urbain

Les éoliennes spécialement conçues pour les villes ont un axe vertical ou horizontal et une puissance de petite ou moyenne, allant jusqu'à 20 KW [37].

En zone de turbulence, les éoliennes à axe horizontal ne fonctionnent pas aussi bien, car leur axe change constamment, ce qui nécessite généralement de les surélever de plusieurs mètres par rapport au toit. De plus, elles sont inefficaces lorsque le vent est très faible, ce qui les rend inadaptées à toutes les zones urbaines.

En revanche, les éoliennes à axe vertical sont plus résistantes aux turbulences et peuvent fonctionner à hauteur de toit (en fonction de l'environnement du bâtiment). De plus, elles ont l'avantage de partir avec peu de vent [37].



Fig.II.12 Éolienne urbaine de deux mètres de diamètre, puissance 1,75 kW à 14 m/s [37]

II.4 Comparaison entre éolienne grande et petite échelle

Les grandes éoliennes ont des capacités nominales allant de 660 kW à 1800 kW (1,8 MW) et sont destinées à être utilisées dans des centrales électriques. Les grandes turbines sont généralement installées dans les parcs éoliens et sont destinées à générer une quantité importante d'électricité pour être livrée au réseau de transport local.

Les petites éoliennes peuvent être connectées au réseau pour produire de l'électricité résidentielle ou industrielle ou pour des applications hors réseau telles que le pompage d'eau ou le chargement de batteries. En général, les petites éoliennes sont construites en une seule ou en un petit nombre. Les petites turbines (puissances inférieures à 1 kW) sont généralement utilisées pour charger les batteries des petites maisons, des cabines et des voiliers. Les turbines de 1 kW à 20 kW sont généralement utilisées pour le pompage de l'eau, les petites entreprises, l'électricité résidentielle, les applications agricoles, les stations de communication à distance et les installations gouvernementales.

Ils font fréquemment partie d'un système hybride qui peut inclure des cellules photovoltaïques, des connexions électriques au réseau, des batteries de stockage et éventuellement des groupes électrogènes diesel de secours. Les applications commerciales/industrielles légères, les grandes fermes et les applications énergétiques villageoises utilisent des turbines d'une puissance nominale de 50 à 250 KW [39].

Tableau.II.2 Avantage et inconvénient d'éolienne grand et petite échelle

	Avantage	Inconvénient
Éolien grand échelle	<ul style="list-style-type: none"> -la puissance d'énergie électrique élevé. - une production d'électricité en gros pour livraison sur le réseau de transport local. 	<ul style="list-style-type: none"> - danger pour passage des oiseaux. - il est collectif. - augmente le coût de la maintenance. - plus bruyant. - difficile de montage.
Éolien petit échelle	<ul style="list-style-type: none"> - il est individuel. - réduit le coût de la maintenance. - moins de bruit. - facilite de montage. 	<ul style="list-style-type: none"> - la puissance d'énergie électrique faible. - la production d'électricité à usage plus résidentielle non industrielle.

II.5 Gisement éolien en Algérie

La vitesse moyenne du vent en Algérie a été identifiée pour la première fois grâce à une étude préliminaire basée sur les données satellitaires du Laboratoire d'« Énergie Éolienne » du CDER. Cette carte de représentation de la vitesse a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes zones avec de bonnes perspectives d'exploitation de l'énergie éolienne. Le deuxième est de souligner la variété relative des ressources dans le pays [40].

Le sud a des vitesses plus élevées que le nord, en particulier le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent 6 m/s dans la région d'Adrar, comme le montre la carte représentée dans la Fig. II.13.

En ce qui concerne le nord, la vitesse moyenne est généralement peu élevée. Néanmoins, il est observé la présence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Béjaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et dans la zone limitée de Béjaïa au nord et de Biskra au sud. Cependant, il ne faut pas négliger que la vitesse du vent varie en fonction des saisons, en particulier lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Une carte saisonnière a clairement démontré que l'automne et l'hiver sont moins ventés. Cependant, il est important de noter que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver d'Adrar [40].

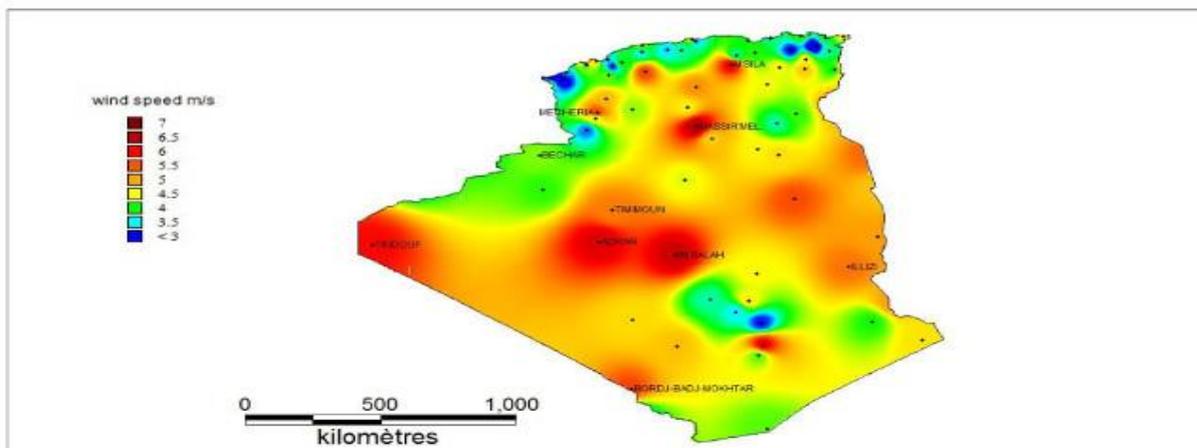


Fig.II.13 Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol [41]

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté les éoliennes, leurs principes de fonctionnement, leur classification, leurs composants, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients et nous avons présenté aussi les éoliennes à petite échelle avec comparaison par rapport à la grande échelle et potentiel éolien en Algérie. Dans le prochain chapitre, nous allons concevoir une éolienne à petite échelle pour une étude de faisabilité de pompage d'eau.

Chapitre III

Etude et conception et Modélisation d'éolienne

III Introduction

Après avoir abordé la présentation et l'étude détaillée de l'énergie éolienne, ainsi que la modélisation énergétique du système éolien, nous nous intéressons dans ce chapitre à l'objectif de cette partie, qui consiste à concevoir véritablement les pièces d'une éolienne domestique à l'aide du logiciel SolidWorks. Nous réaliserons une simulation de ce système en utilisant le programme MATLAB / Simulink. À travers cette simulation, nous modéliserons les éoliennes, ainsi que les principaux composants généraux des éoliennes, allant de la turbine au générateur jusqu'à la charge. Nous travaillerons à convertir les équations que nous avons obtenues en modèles et schémas dans Simulink.

III.1 Choix de nombre parfait de lames

La plupart des éoliennes fonctionnent généralement avec trois pales. En fait, la décision de créer une turbine à trois pales était un compromis.

En termes d'efficacité énergétique, une seule pale serait le nombre idéal en raison de la traînée réduite. Cependant, une pale seule peut déséquilibrer la turbine, ce qui n'est pas une option viable pour assurer la stabilité de la turbine.

De même, les éoliennes à deux pales consomment plus d'énergie que celles à trois pales, mais elles présentent leurs propres problèmes. Les éoliennes à deux pales sont plus susceptibles d'osciller en raison d'un phénomène appelé précession gyroscopique. Cette oscillation introduit naturellement de nouveaux problèmes de stabilité pour l'ensemble de la turbine. De plus, cela exerce une pression sur les composants de la turbine, ce qui entraîne une usure et une diminution de l'efficacité avec le temps.

Une éolienne avec plus de trois pales est moins efficace qu'une éolienne à trois pales, car elle crée une plus grande résistance au vent et ralentit la production d'électricité.

Pour ces raisons, une turbine à trois pales est la meilleure solution pour combiner un rendement énergétique élevé avec une plus grande stabilité et durabilité de la turbine elle-même [42].

III.2 Caractéristique d'éolienne

Tableau.III.1 Caractéristique d'éolienne

WE - 1 kW	
Performance	
Puissance nominale	1 KW
Vitesse de vent de démarrage	3 m/s
Vitesse de vent de puissance nominale	12 m/s
Vitesse de vent maximale de service	20 m/s
Rotor	
Diamètre	2 m
Nombre de pales	3
Matériaux	Bois
Type	face au vent
Multiplicateur	
Type	entraînement direct
Rapport	2.7
Générateur	
Type	aimants permanents
Vitesse de rotation max	2100 rpm
Tension	12V
Connexion au réseau	non
Régulateur et système de sécurité	
Régulation vitesse de vent	effacement
Régulation survitesse	effacement
Orientation	gouvernail aval
Système de freinage	-
Mâts	
Mâts tubulaires haubanés basculants	-
Mâts treillis haubanés basculants	-
Mâts treillis autonomes	Oui
Masses	
Nacelle complète	7.2 Kg
Options	
Protection marine	-

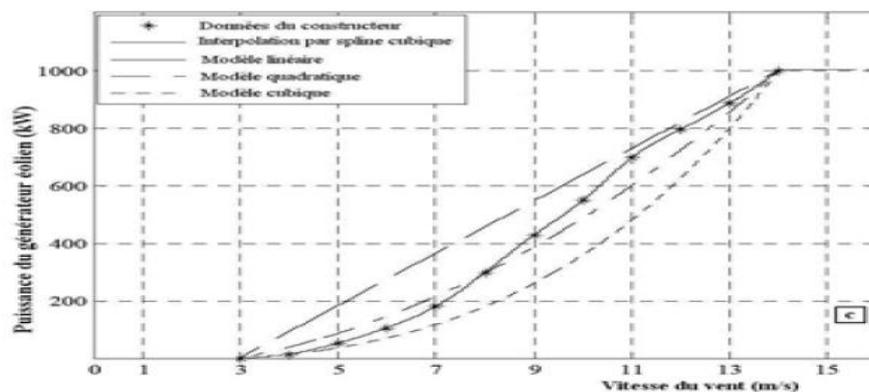


Fig.III.1 Courbes de puissances de l'éolienne

III.3 Utilisation de logiciel SolidWorks pour la conception d'éolienne domestique

SolidWorks est une application de conception mécanique qui utilise l'interface graphique de Microsoft Windows.

Les concepteurs peuvent rapidement dessiner une idée, expérimenter avec les fonctions et les aspects et créer des modèles et des mises en plans précis avec ce logiciel. Comme il peut anticiper les exigences potentielles pour réduire au minimum les efforts de ré-conception lorsqu'on veut modifier le modèle.

III.3.1 Conception géométrique de l'éolienne

Il est prévu que la conception de l'éolienne à axe horizontal (Modèle WE 1KW) commence par des plans de tous les éléments, puis qu'ils soient assemblés jusqu'au modèle final. Les figures suivantes illustrent cette idée.

III.3.2 Présentation générale de l'éolienne

L'éolienne récupère une partie de l'énergie cinétique de la masse d'air en mouvement, la transforme en énergie mécanique par l'intermédiaire des pales, accouplés à un rotor, puis en énergie électrique grâce à une génératrice de puissance nominale de 1000W. L'éolienne est composée de trois parties, une partie fixe constituant le mât, la deuxième partie : générateur assemblé, tige caudale et aileron caudal et la troisième partie tournante composée d'un rotor de diamètre 1.8 m et un multiplicateur (train planétaire).

III.4 Conception et réalisation géométrique des pièces de l'éolienne

Un modèle 3D peut être créé en utilisant des fonctions comme l'extrusion et la révolution une fois l'esquisse terminée.

Les fonctions basées sur des illustrations ont des formes spécifiques (bossage, enlèvement de matière, perçage, etc.). D'autres, comme les balayages et les lissages, utilisent un profil sur une trajectoire. Des fonctions appliquées telles que les congés, les chanfreins et les coques sont également présentes. Toutes les pièces ont des fonctions basées sur des illustrations et la majorité des pièces ont des fonctions appliquées.



Fig.III.2 conception géométrique des pièces de moyeu

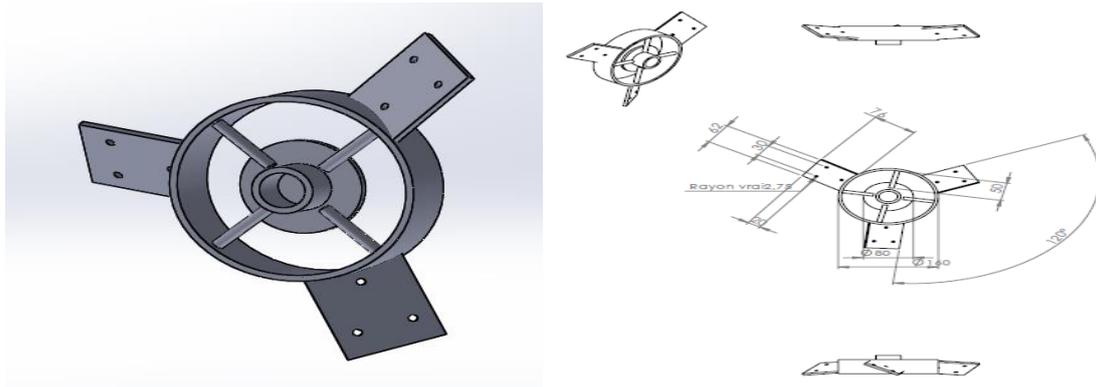


Fig.III.3 Assemblage de moyeu

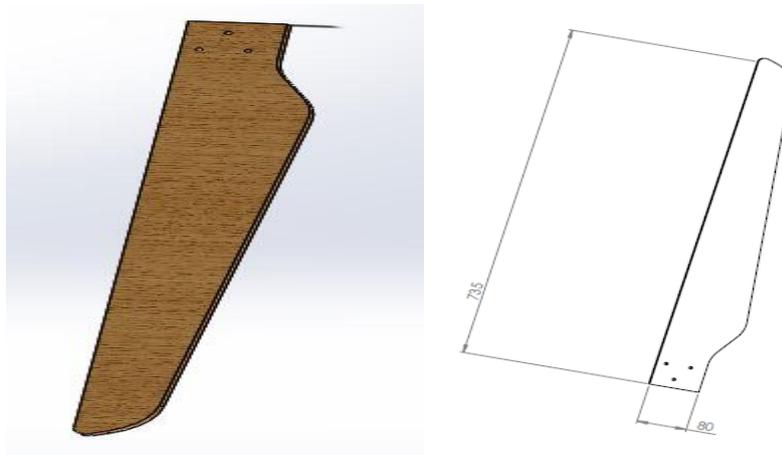


Fig.III.4 conception géométrique de pièces de pale

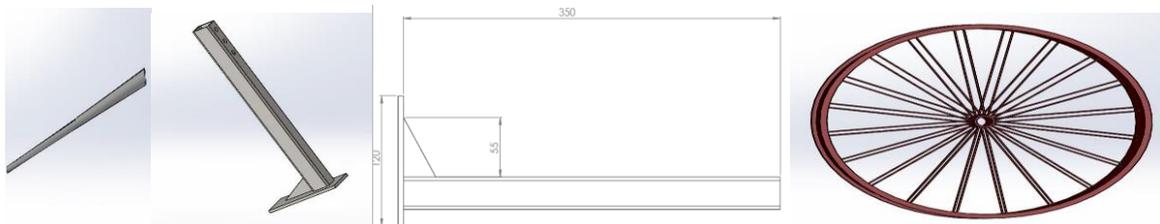


Fig.III.5 conception géométrique de pièces de multiplicateur de vitesse

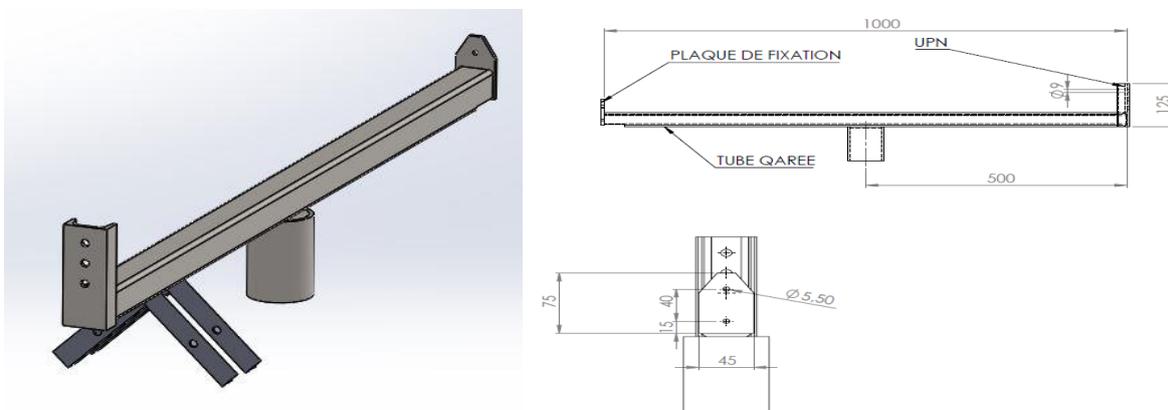


Fig.III.6 conception géométrique de pièces d'axe d'éolienne



Fig.III.7 conception géométrique de pièces d'alternateur

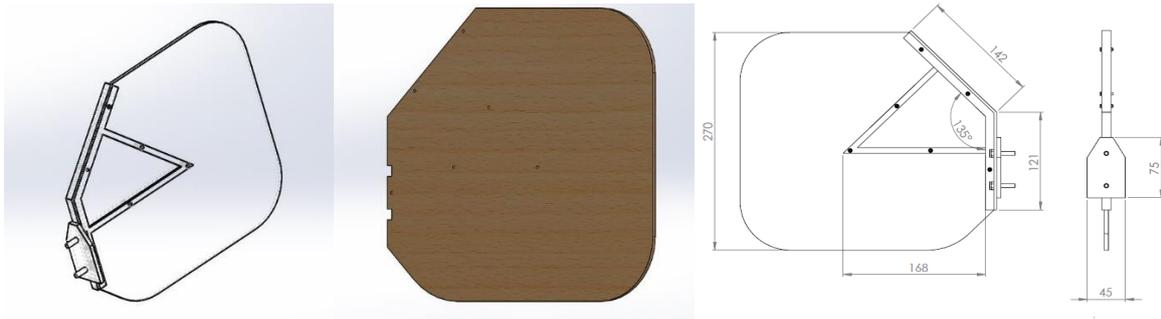


Fig.III.8 conception géométrique de pièces de girouette d'orientation

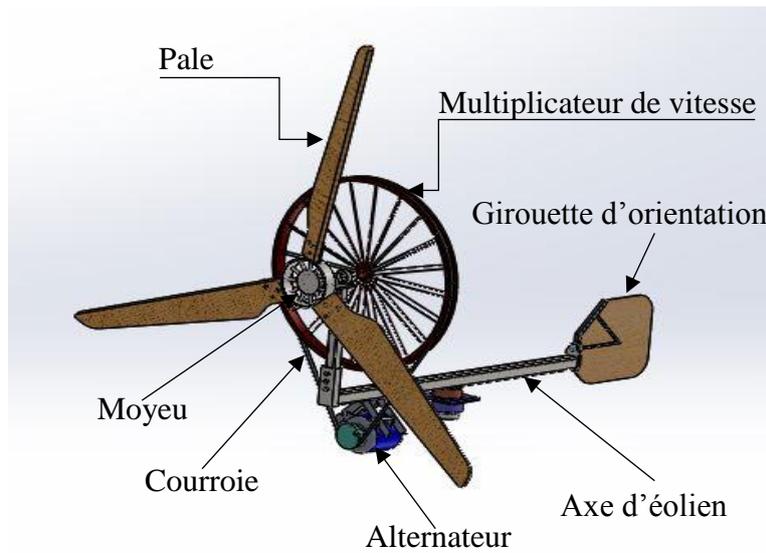


Fig.III.9 Assemblage générale d'éolienne

III.5 Réalisation d'éolien



Fig.III.10. Réalisation d'éolienne

III.6 Modélisation de la configuration choisie

III.6.1 Logiciel Matlab

Matlab est un logiciel de programmation et d'analyse numérique largement utilisé dans les domaines scientifiques et d'ingénierie. Le nom "Matlab" est dérivé de "Matrix Laboratoire". Le logiciel propose également une vaste bibliothèque de fonctions mathématiques et d'outils d'analyse qui couvrent un large éventail d'applications, y compris les calculs numériques, les statistiques, l'optimisation, le traitement du signal, l'imagerie, la modélisation et la simulation. Il est souvent utilisé pour résoudre des problèmes complexes, réaliser des simulations, effectuer des analyses de données, concevoir des systèmes et des algorithmes, et créer des visualisations graphiques.

III.6.2 Modélisation de l'éolienne

Afin d'estimer la production d'énergie, nous établirons un modèle déterminant la puissance caractéristique fournie en fonction de la vitesse du vent V_w . Ce modèle se compose de deux parties principales mécanique et électrique. Nous simulons ce modèle dans le logiciel Simulink sur MATLAB et présentons les résultats sous forme de courbes illustrées ci-dessous.

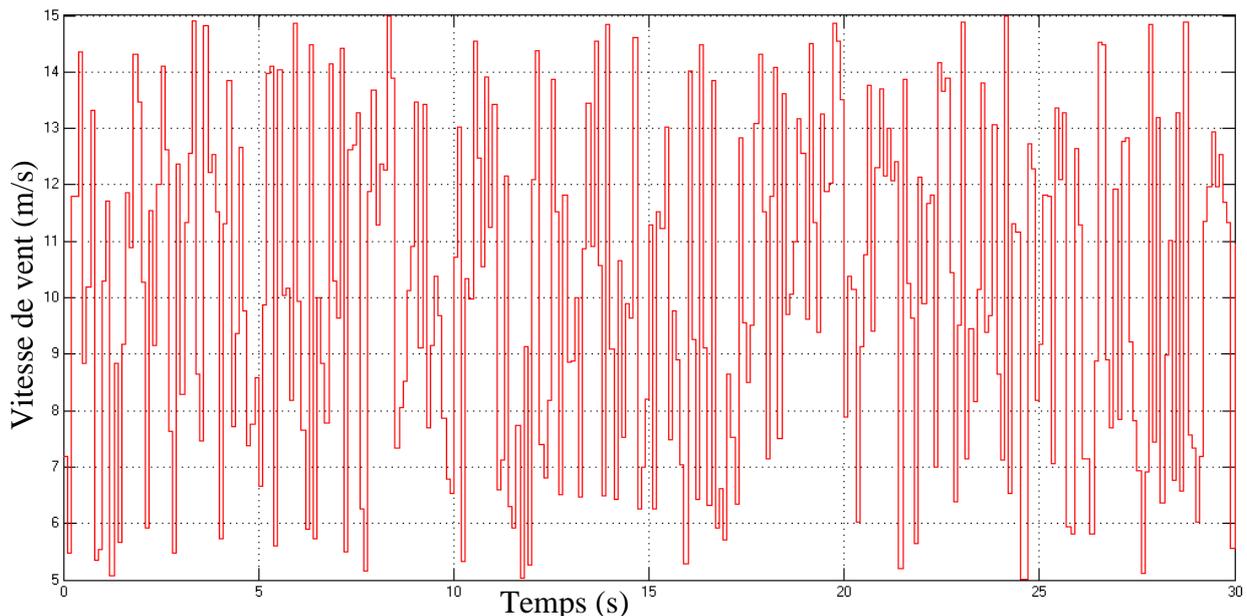


Fig.III.11 Profil de vitesse du vent

III.6.3 Partie mécanique

La partie mécanique est formée de la turbine qui convertit l'énergie cinétique en énergie mécanique et du multiplicateur qui est l'intermédiaire entre la partie électrique et mécanique, nous avons choisis un model simplifié existant sur la bibliothèque Simulink et qui résume les principaux paramètres de cette partie [43], [44].

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\theta, \lambda) * \rho * \pi * R_p^2 * V_w^3 \quad (III.1)$$

P_m: Puissance mécanique du vent.

C_p (Θ, λ): coefficient de performance fonction de λ et θ.

ρ: densité de l'air.

R_p: surface balayée par les pales du rotor où r est le rayon du rotor (m2).

V_w: vitesse du vent.

Tel que la densité de l'air soit ρ = 1,3Kg / m3.

$$\text{Et } \lambda = \frac{R_p * \omega_g}{V_w} \quad (III.2)$$

λ: rapport de vitesse de pointe.

R_p: surface balayée par les pales du rotor où r est le rayon du rotor (m2).

ω_g: vitesse du rotor du générateur.

V_w: vitesse du vent.

Le coefficient de performance C_p est donné par un aperçu simplifié du modèle de la littérature:

$$C_p(\theta, \lambda) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_2 * \theta - C_4 \right) * \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + \lambda_i C_6 \quad (III.3)$$

Où: C₁ = 0.5716; C₂ = 116; C₃ = 0.4; C₄ = 5; C₅ = 21; C₆ = 0.0068.

C_p (Θ, λ): coefficient de performance fonction de λ et θ.

Θ: angle de pas des pales du rotor.

λ_i: rapport de vitesse de pointe.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.08 * \theta} + \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \quad (III.4)$$

Θ: angle de pas des pales du rotor.

λ_i: rapport de vitesse de pointe.

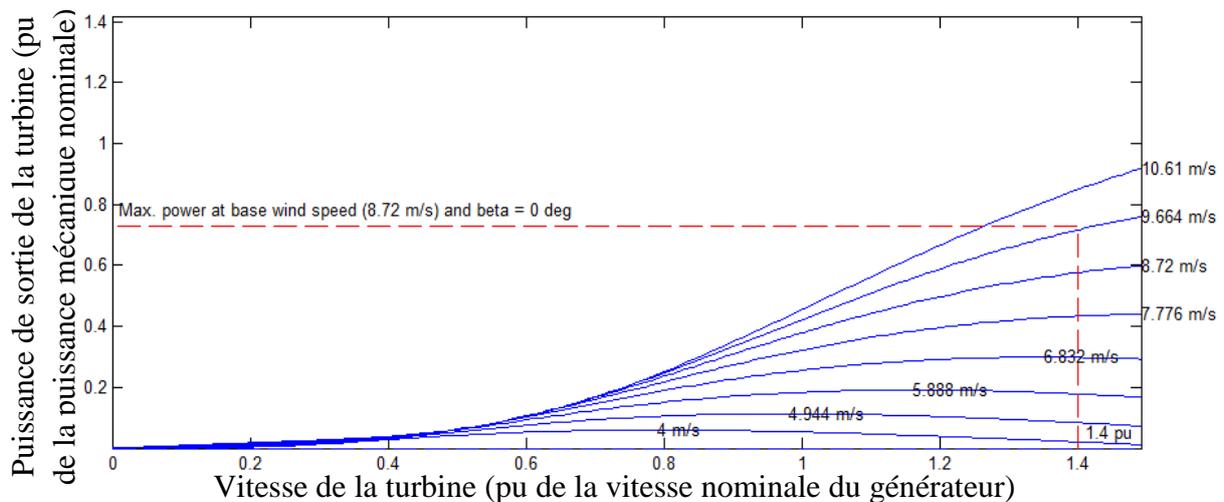


Fig.III.12 La caractéristique du coefficient de puissance

Afin d'observer les courbes de la caractéristique (vitesse spécifique et coefficient de puissance), nous avons fait varier la valeur de θ et les constantes C sont données ci-dessus :

Nous supposons que la vitesse moyenne du vent $V_w = 8.72$ m/s et l'angle d'inclinaison $\theta = 3^\circ$, afin d'estimer le coefficient de performance optimal $C_{p_{opt}}$ et la vitesse spécifique optimale λ .

III.6.4 Modèle de turbine

L'éolienne convertit la vitesse du vent en puissance mécanique pouvant être obtenue à partir du vent. Cette conversion est basée sur les équations données précédemment tandis que le couple du générateur qui satisfera l'éolienne optimale est indiqué dans l'équation ci-dessous [45] :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_G} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R p^5 \cdot C_p(\theta, \lambda) \cdot \omega_G^2}{2 \cdot \lambda^2 \cdot G^3} \tag{III.5}$$

T_m: Couple sur l'arbre rapide.

P_m: Puissance mécanique du vent.

ω_G: vitesse du rotor du générateur.

C_p: coefficient de performance fonction de λ et θ .

ρ: densité de l'air.

R_p: surface balayée par les pales du rotor où r est le rayon du rotor (m²).

λ: rapport de vitesse de pointe.

G: Rapport de vitesse.

$$\omega_G = \frac{1}{J} (T_m - T_e - T_{loss}) dt \tag{III.6}$$

ω_G: vitesse du rotor du générateur.

T_m: Couple sur l'arbre rapide.

T_e: Couple du générateur.

T_{loss}: Couple de perte.

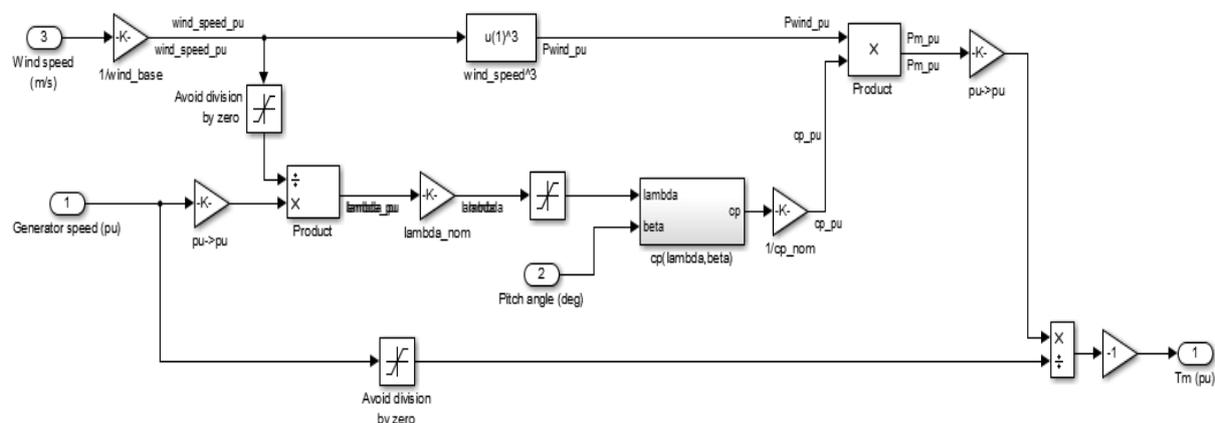


Fig.III.13 Modèle d'éolienne

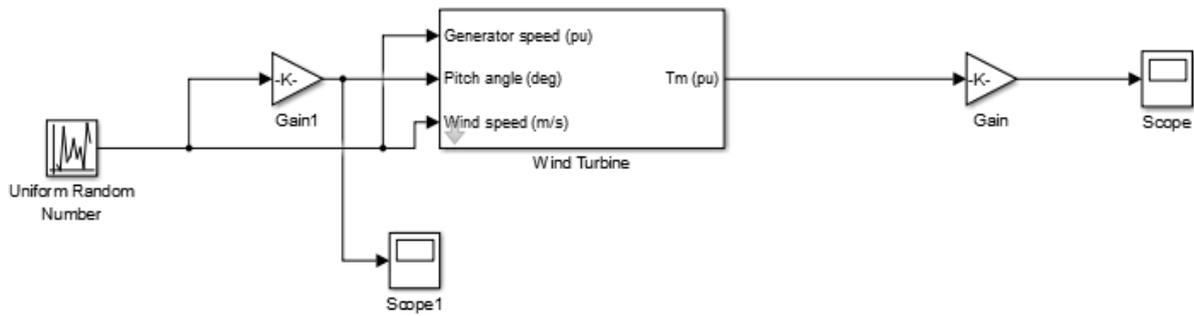


Fig.III.14 Modèle d'éolien global

Paramètres de simulation

Tableau.III.2 Simulation des paramètres de la pièce mécanique

Paramètre	Connotation	Valeur
densité de l'air	ρ	1.3 kg /m ³
Rayon des turbines	r	0.875 m
Rapport de démultiplication	G	8°
Courant de sortie optimal	$I_{out(opt)}$	80 A
Tension de sortie optimale	$V_{out(opt)}$	12.90 V

Résultats de simulation

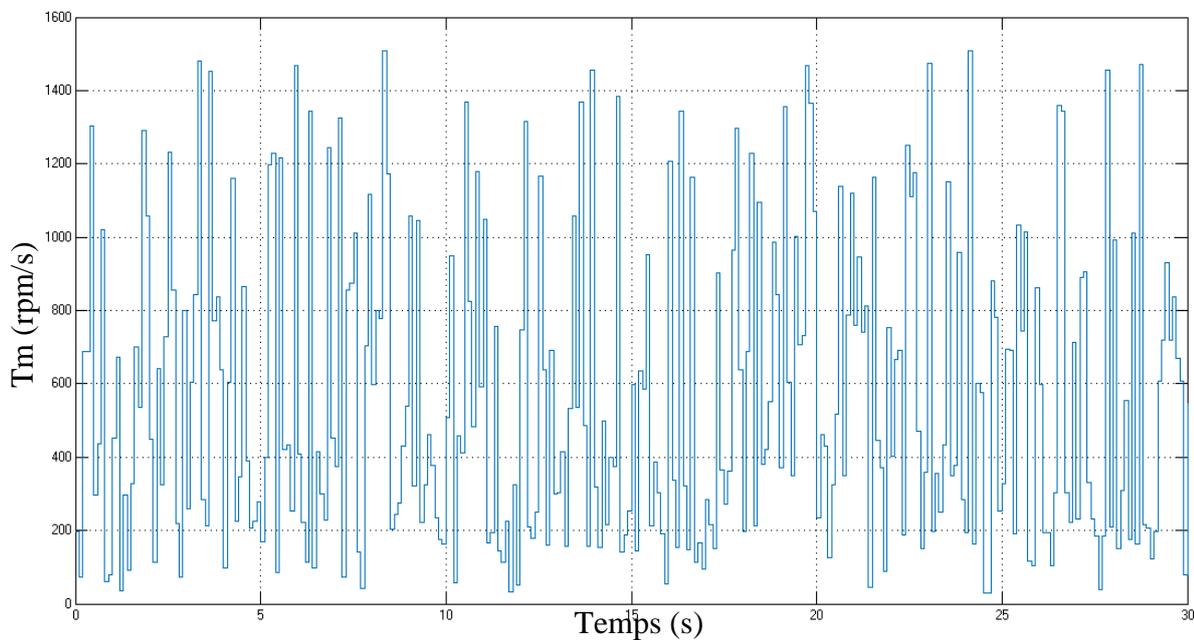


Fig.III.15 Modèle d'éolien global

La (Fig.III.13) représente la variation de rotation de multiplicateur, elle dépend directement de la vitesse du vent et du coefficient C_p ; la valeur de rotation varie entre 40rpm et 1590rpm.

III.6.5 Partie électrique

La partie électrique est constituée de l'alternateur de la voiture qui joue le rôle de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, il est également équipé d'un régulateur de tension qui contrôle la tension en sortie de l'alternateur.

Le bloc alternateur de notre étude est tiré de la bibliothèque Matlab/Simulink de façon simplifiée, ce modèle est une fonction mathématique de la vitesse de rotation de la turbine convertie en rad/s2rpm et de la tension régulée Vf. Le schéma du bloc est représenté ci-dessous :

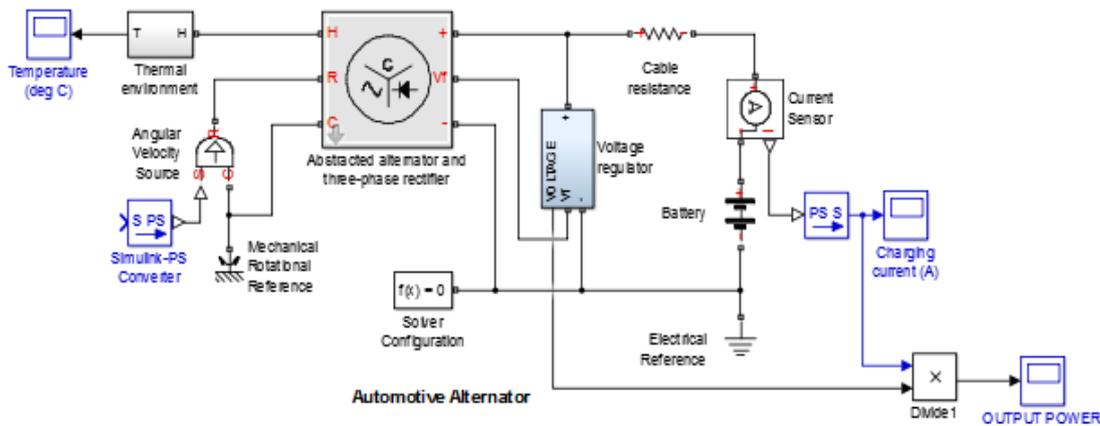


Fig.III.16 Modèle d'alternateur

Modèle de régulateur de tension

$$V_f = \min_v[(C - V)]K_p \tag{III.7}$$

Vf: la tension de sortie.

C: la constante C qui représente la tension de référence.

V: la tension de la batterie.

Kp: la constante des pertes.

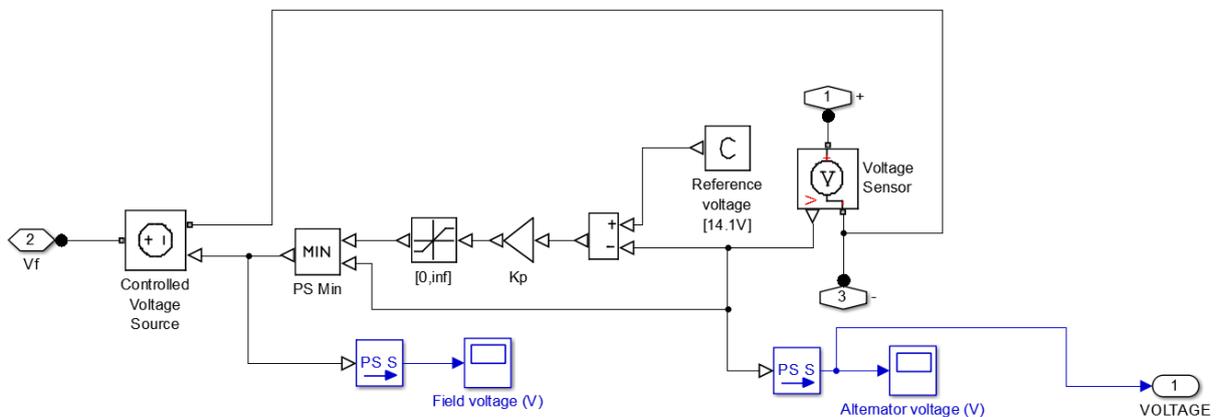


Fig.III.17 Modèle de régulateur de tension

Paramètres de simulation

Tableau.III.3 Simulation des paramètres de la partie électrique

Paramètre	Connotation	Valeur
Note d'ampère-heure	Vnom	12.90V
tension nominale	AH	80 A

Résultats de simulation

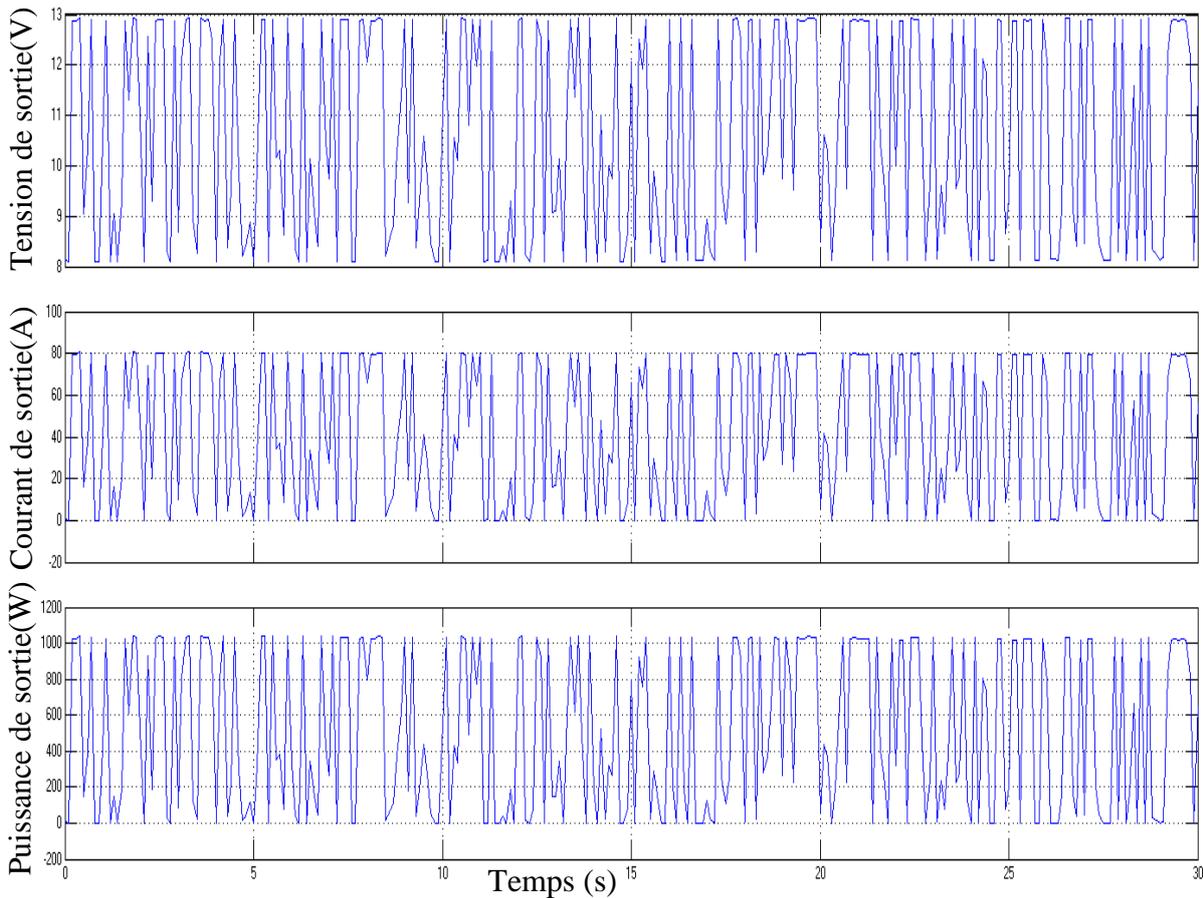


Fig.III.18 Données de sortie du générateur

La courbe ci-dessus sur la Fig.III.16 montre les données de sortie de l'éolienne, en premier lieu la courbe de tension qui est donnée par une moyenne de 12.9 volts on peut observer que la chute de tension à 8 volts due à une faible vitesse de vent, idem pour le courant électrique qui atteint 0 A comme le montre la deuxième courbe où le courant est donné par une moyenne de 80 A. la 3ème courbe qui représente la variation de puissance électrique à la sortie du générateur dont elle dépend de la tension et le courant électrique du générateur la puissance de sortie est donnée par une moyenne de 1000 watts mais elle chute à 0 watts en raison de la variation de courant et de tension, durant ces période deux solution ont été adaptées, la première concerne la batterie qui sera sollicité pour amortir le manque d'électricité la deuxième est le réservoir prévu pour le stockage d'eau en hauteur supérieur pour une future utilisation.

Chapitre IV

Analyse et validation des résultats

IV Introduction

La demande en eau augmente de nos jours. Dans les zones rurales et les endroits isolés où l'accès à l'énergie traditionnelle est difficile, le problème est particulièrement aigu. L'intérêt pour l'utilisation de l'énergie éolienne comme nouvelle source d'énergie a augmenté en raison de ce phénomène. Dans cette section, nous examinerons la possibilité d'utiliser l'énergie éolienne pour pomper l'eau sur une ferme agricole.

IV.1 Systèmes éoliens dans les sites isolés

Dans les sites isolés, les systèmes de production sont généralement petits et utilisent quelques formes de stockage d'énergie. Les batteries peuvent être utilisées pour ce stockage, et il y a un dispositif qui peut contrôler la charge et la décharge de la batterie. Pour alimenter les appareils qui fonctionnent avec un réseau à courant alternatif, un onduleur est nécessaire. Le schéma de la figure IV.1 résume le principe de fonctionnement d'une éolienne de production d'électricité.

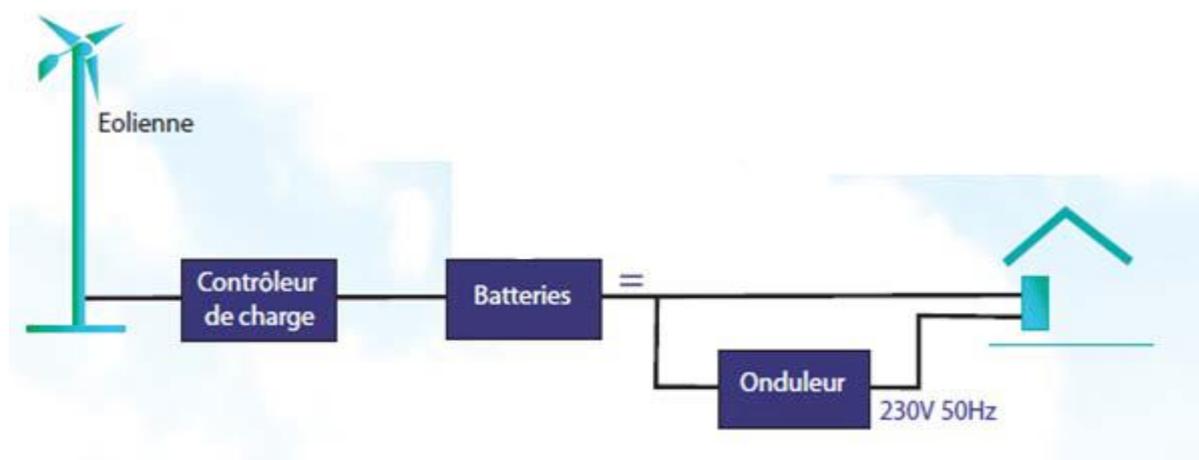


Fig.IV.1 Une petite éolienne à axe horizontal pour un site isolé « Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau »

IV.2 Choix d'un petit système éolien pour l'alimentation en électricité et en eau d'une ferme agricole

Comparé aux groupes motopompes, un petit système éolien d'une capacité de 1 à 10 kW peut constituer une solution compétitive.

Le petit éolien peut fournir une source d'énergie non polluante tout en réduisant le coût de l'électricité pour les fermes isolées où le réseau électrique n'est pas disponible.

De plus, les cultures ne sont pas affectées par les petits systèmes éoliens des fermes. Contrairement aux panneaux solaires qui occupent un espace considérable, l'installation d'une éolienne dans une ferme permet de conserver plus de 98 % de la surface cultivable.

IV.3 Éolienne de pompage

Le type de machine à développer détermine le design d'une éolienne de pompage. Il est important de différencier les éoliennes de pompage mécanique des éoliennes de pompage électrique. En revanche, la hauteur manométrique de pompage peut être élevée et la pompe peut être installée loin de l'éolienne. Les pompes à piston utilisées dans les éoliennes de pompage mécanique fonctionnent mieux à des vitesses de rotation modérées.

Les éoliennes de pompage offrent toujours une solution économique pour l'irrigation des champs agricoles et l'alimentation en eau potable des habitants dans les régions où le réseau électrique n'est pas disponible. Pour choisir le type d'éolienne de pompage à installer, il est nécessaire d'avoir les informations suivantes :

- La vitesse moyenne du vent.
- La hauteur manométrique de pompage.
- Les besoins journaliers en eau.
- La qualité de l'eau et les moyens de stockage.

Un système de pompage éolien électrique pour l'irrigation d'une ferme est illustré dans le schéma ci-dessous. L'énergie éolienne alimente la pompe immergée.

La pompe immergée transporte l'eau du puits vers un réservoir en hauteur. Le champ agricole est alimenté par gravité du réservoir. Lorsque le réservoir est plein, l'énergie supplémentaire peut être stockée dans des batteries pour être utilisée lorsqu'il n'y a pas de potentiel éolien.

De nos jours, la majorité des éoliennes sont à axe horizontal de type amont (rotor face au vent) avec deux à trois pales, généralement fabriquées en matériau composite, résine et fibre de verre. Afin de les maintenir face au vent, les petites éoliennes sont équipées d'un gouvernail d'orientation. Pour placer l'éolienne face au vent, les éoliennes de plus de 25 kW ont souvent un système d'orientation actif avec des moteurs pas-à-pas [46].

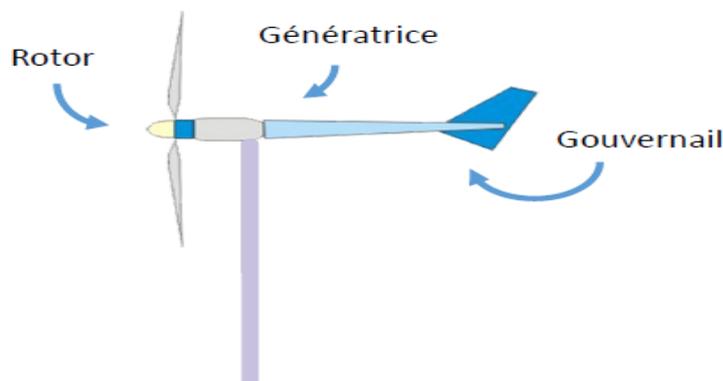


Fig.IV.2 Schéma d'une éolienne à axe horizontal [46]

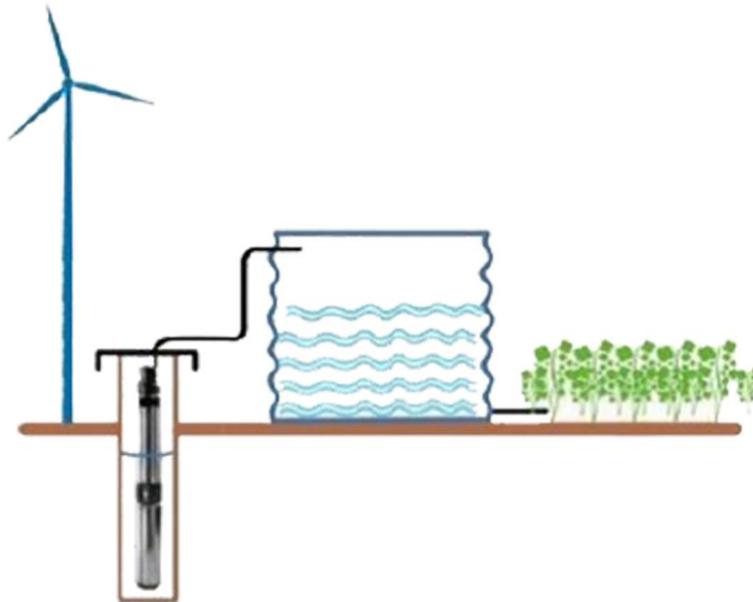


Fig.IV.3 Schéma d'une éolienne de pompage [46]

IV.4 Critères de choix d'un site éolien pour installer une petite éolienne

Les étapes les plus importantes lors de l'installation d'une éolienne dans un site, afin de déterminer l'éolienne la plus adaptée [47], [48] sont :

IV.4.1 Estimation des besoins en énergie

La détermination des besoins en énergie est cruciale. En effet, qu'il s'agisse d'une installation agricole aux besoins élevés ou d'un foyer souhaitant simplement être autonome, l'éolienne ne sera pas la même.

IV.4.2 Le potentiel éolien du site

La localisation d'une éolienne joue un rôle important dans son efficacité. Même si les petites éoliennes nécessitent moins de vent que les grandes, une éolienne fonctionne mieux si les vents sont réguliers et fréquents. Cependant, des niveaux excessifs sont atteints, ce qui entraînerait la destruction de l'éolienne.

IV.4.3 Analyse locale

IV.4.3.1 Variation de la hauteur

La vitesse du vent augmente avec la hauteur, plus le vent monte, et ceci d'autant plus que le vent est perturbé en surface. Le frottement du sol ralentit le vent, qui est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural ouvert, par exemple. Lorsque le vent rencontre un obstacle isolé, il est fortement perturbé, comme le montre la figure (IV.4).

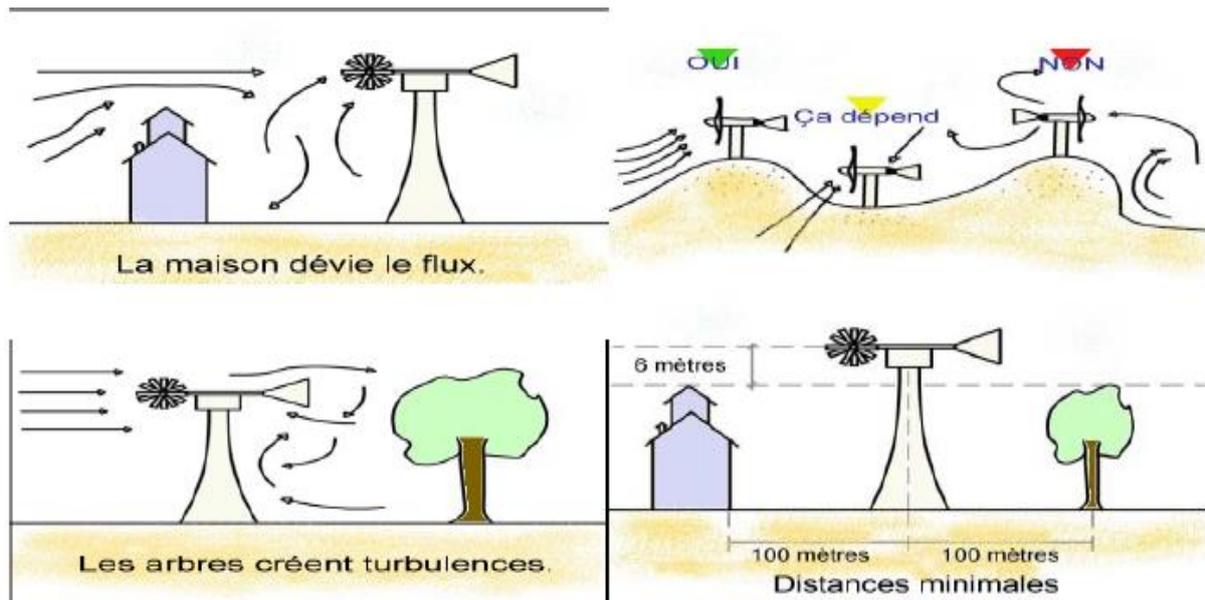


Fig.IV.4 L'effet de différent choix d'emplacement d'une éolienne sur le vent capté

IV.4.3.2 Types de mâts

Les fabricants et les distributeurs dimensionnent ces supports en prenant en compte tous les facteurs tels que le type d'éolienne, les efforts, les vibrations, le flambage, la garde d'hélice et la nature des fondations. Les premières installations d'éoliennes domestiques démarrent à 10 mètres pour être rentables [48].

Il est préférable de privilégier les mâts autoporteurs afin de limiter l'impact visuel de l'éolienne personnelle, de limiter l'occupation au sol et de simplifier les travaux de génie civil.

IV.4.3.3 Identifier les contraintes liées à la construction

En plus de valider le gisement éolien, il est important de noter toutes les difficultés potentielles qui pourraient entraver la mise en œuvre du projet. La propriété des terrains et leur statut juridique doivent être pris en compte. Si la hauteur totale de l'éolienne (généralement une puissance supérieure à 10 kW) dépasse 12 mètres, un permis de construire est nécessaire. S'il s'agit d'éoliennes qui vendent toute leur production au réseau électrique, le document est déposé en Mairie et est signé par le Préfet du Département [47].

IV.5 Étude et simulation d'un système éolien dédié au pompage d'eau

IV.5.1 Logiciel Homer

HOMER est un logiciel de simulation et d'optimisation pour l'étude d'installations de production d'énergie multi sources (PV, éolien, réseau, stockage, diesel...). Il est principalement conçu pour simuler des mini-réseaux connectés ou non connectés. Le National Renewable Energy Lab, qui dépend du ministère américain de l'énergie, a commencé à le développer.

IV.5.2 Site d’implantation

La figure IV.5 montre le site géographique sur la carte. La zone d’étude considérée est située dans la commune d’El Kharrouba, Boudouaou dans la wilaya de Boumerdès, en Algérie. Cette région est dotée d’une hauteur de 106 m où se situe la ferme agricole à alimenter en eau, cette ferme possède un puits d’une profondeur 10m.

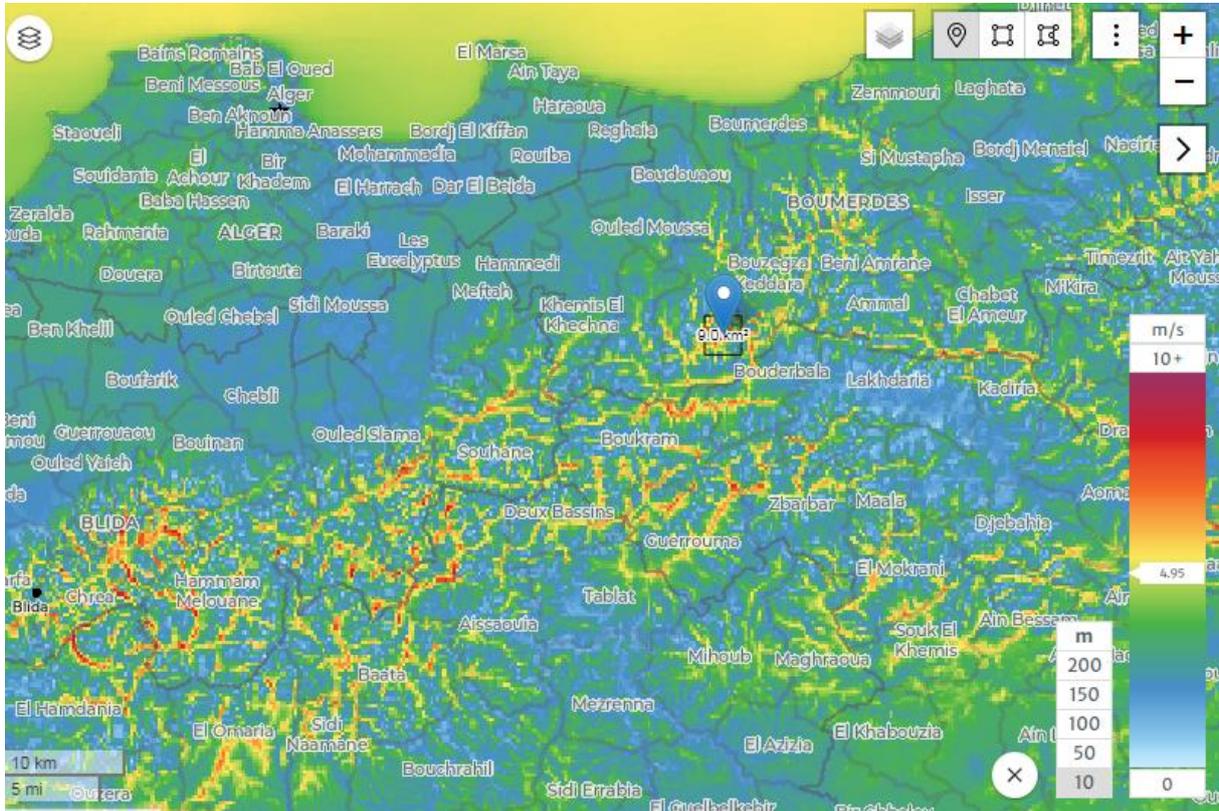


Fig.IV.5 Site implantation (global Wind atlas) [49]

IV.5.2.1 Vitesse de vent dans le site El kharrouba

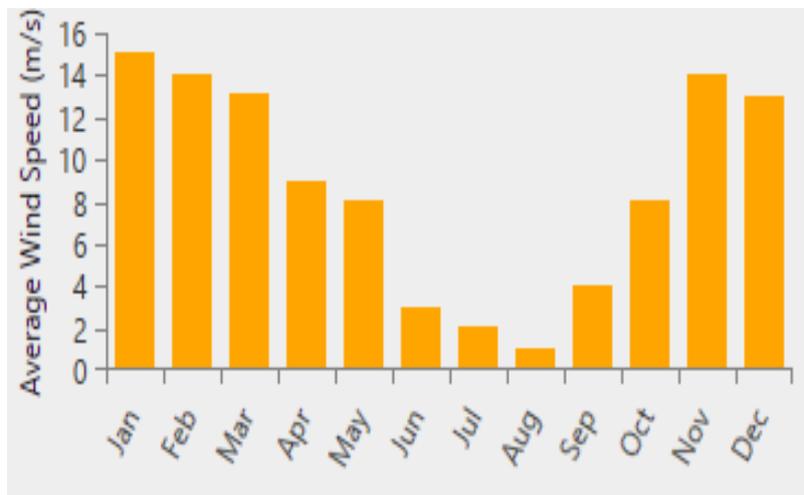


Fig.IV.6 Schéma vitesse de vent (la vitesse moyenne 8.7m/s)

IV.5.2.2 Consommation électrique

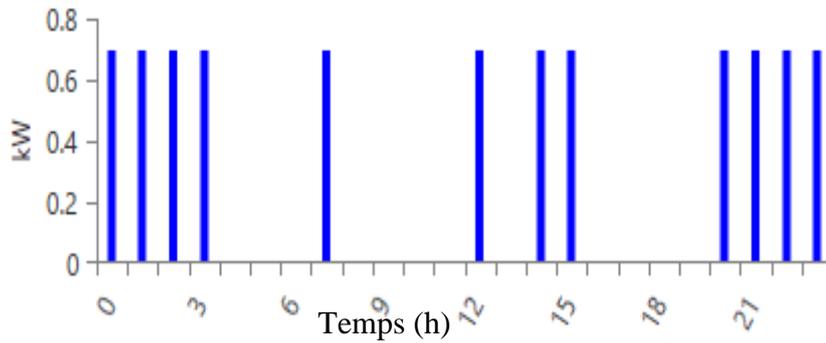


Fig.IV.7 Schème de consommation électrique

IV.5.3 Système d'éolienne

La figure ci-dessous illustre le système éolien (éolienne, onduleur, les batteries stockage) dimensionné pour le pompage de l'eau.

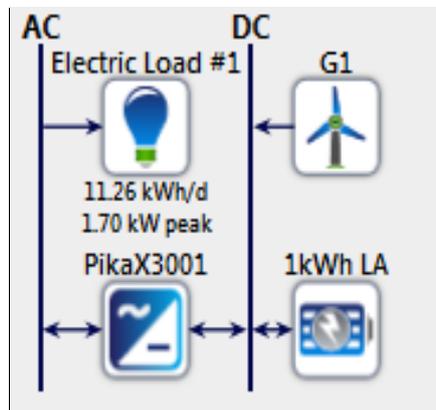


Fig.IV.8 Schème du système éolien



Fig.IV.9 TROTEC Pompe de puits TDP 370 E [50]

IV.5.3.1 Caractéristique de pompe immergée

La pompe TDP 370 E est une pompe de forage de 700 watts à pression max de 3,7 bar, hauteur de refoulement max de 40 mètres et immersion max à 20 m parfaite pour le tirage d'eau claire de points d'eau en profondeur présentant un diamètre min de 12 [50].

IV.5.3.2 Caractéristique du système éolien

Tableau.IV.1 Caractéristique du système éolien

Composant	Caractéristique
Une éolienne	WE- 1kw
Une batterie	(12V/83.4A) , 1Kwh
Un onduleur	3Kw
Une pompe d'eau	700W

IV.5.4 Résultats énergétiques

IV.5.4.1 Production et consommation

Tableau.IV.2 montre la quantité d'énergie production et consommation chaque année par les éoliennes

	KWh/an
Production	5,005
Consommation	2,464

Remarque

Nous notons que la quantité d'énergie produite est beaucoup plus grande que la quantité d'énergie consommée. Il est possible d'avoir des moments où la production d'énergie éolienne dépasse la consommation, notamment lorsque les conditions météorologiques sont favorables et que la demande en électricité est faible.

Production électrique

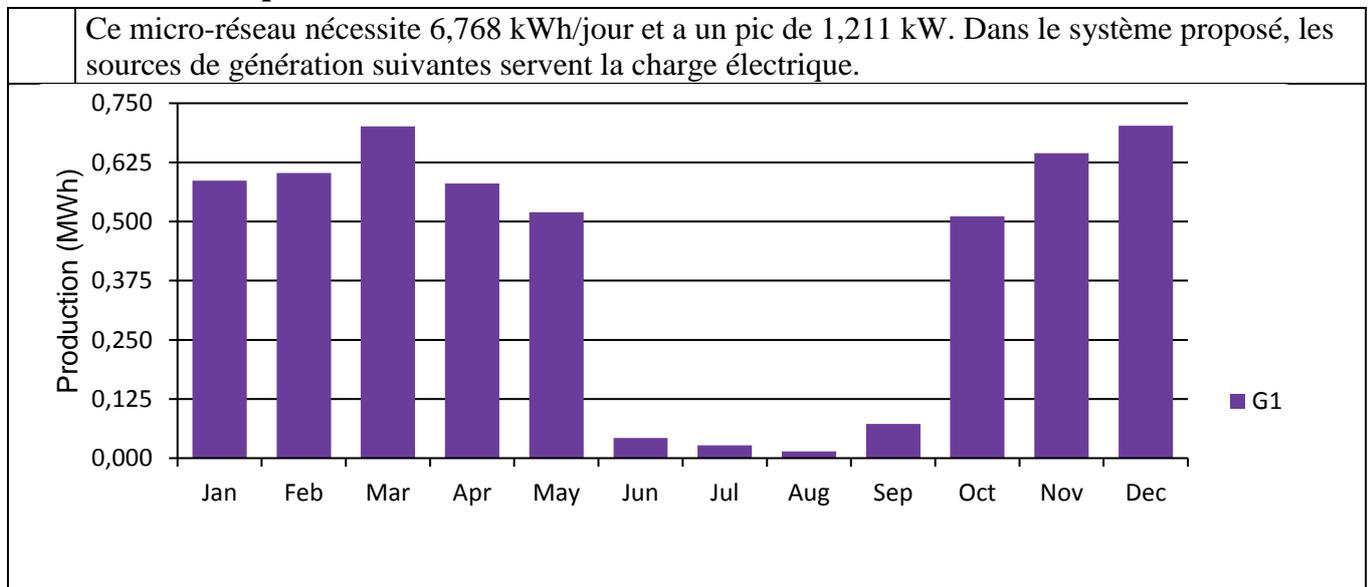


Fig.IV.10 Énergie produite chaque mois par éolienne

Remarque

À partir de la courbe, nous notons que la plus grande valeur de l'énergie produite est durant le mois de mars et décembre alors que la plus faible valeur enregistrée est en mois de juin à septembre. Cela est dû aux variations des vitesses de vent

Eolienne : WE - 1 Kw

La puissance de sortie du système d'éolienne générique, évaluée à 1,00 kW, est de 5 005 kWh/an.			
Quantité	1	Capacité nominale	1.00 kW
Production totale d'éoliennes	5,005 kWh/ans	Heures d'ouverture	8,690 h/ans
Coût en capital	51,051.ج.د	Coût de maintenance	1,000 /ج.د.ans
Durée de vie de l'éolienne	20.0 ans		

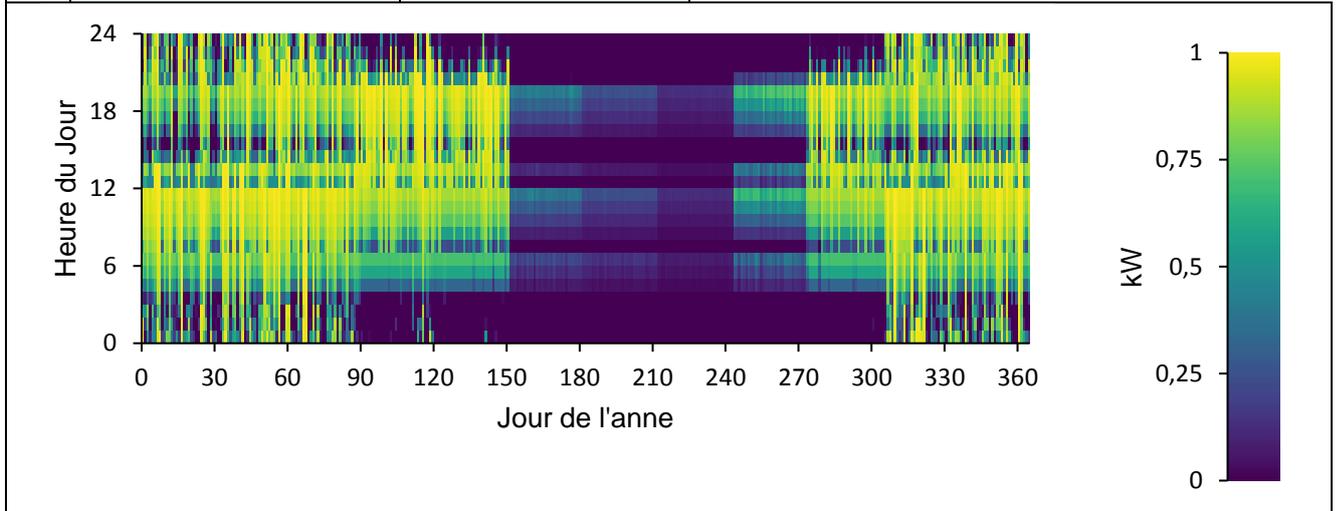


Fig.IV.11 Puissance produite par éolienne (jour /Anne)

Convertisseur : Pika Grid-Tie Hybrid X3001

Capacité	3.00 kW	Heures d'ouverture	4,376 heure/an
Sortie moyenne	0.281 kW	Sortie d'énergie	2,464 kWh/an
Sortie minimale	0 kW	Entrée d'énergie	2,567 kWh/an
Sortie maximale	1.21 kW	Pertes	103 kWh/an
Facteur de capacité	9.38 %		

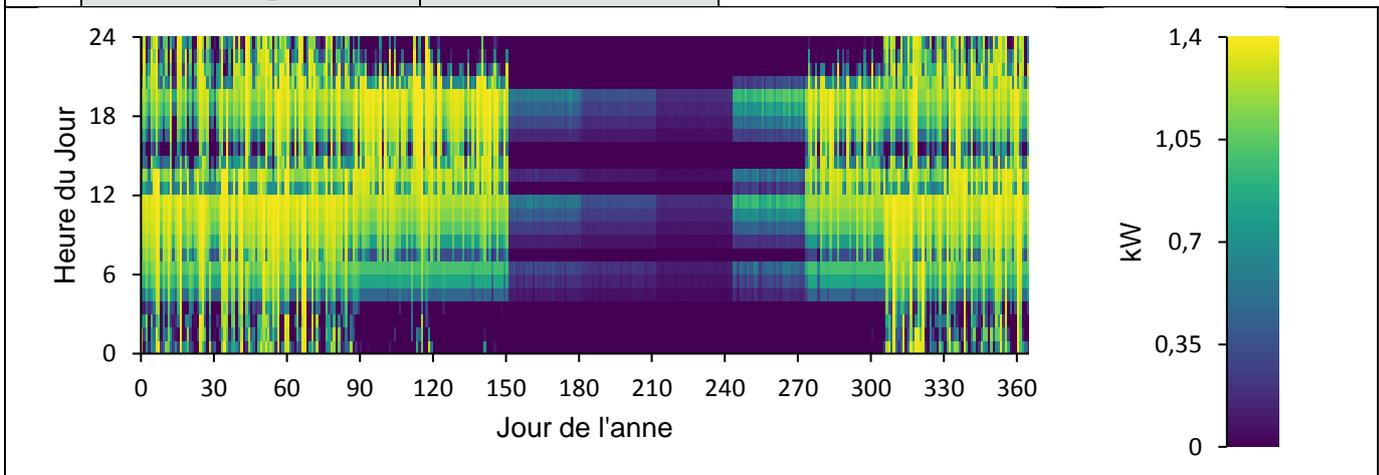


Fig.IV.12 Puissance convertie par convertisseur (jour /Anne)

Stockage : Acide de plomb générique 1kWh

La capacité nominale du système de stockage générique est de 1,00 kWh. Le débit annuel est de 333 kWh/an.			
Capacité nominale	1.00 kWh	Durée de vie prévue	2.41 an
Débit annuel	333 kWh/an	Coûts en capital	24,000.د.ج.
Coût de maintenance	500 / .ج. -an	Pertes	74.3 kWh/an
Autonomie	1.28 heure		

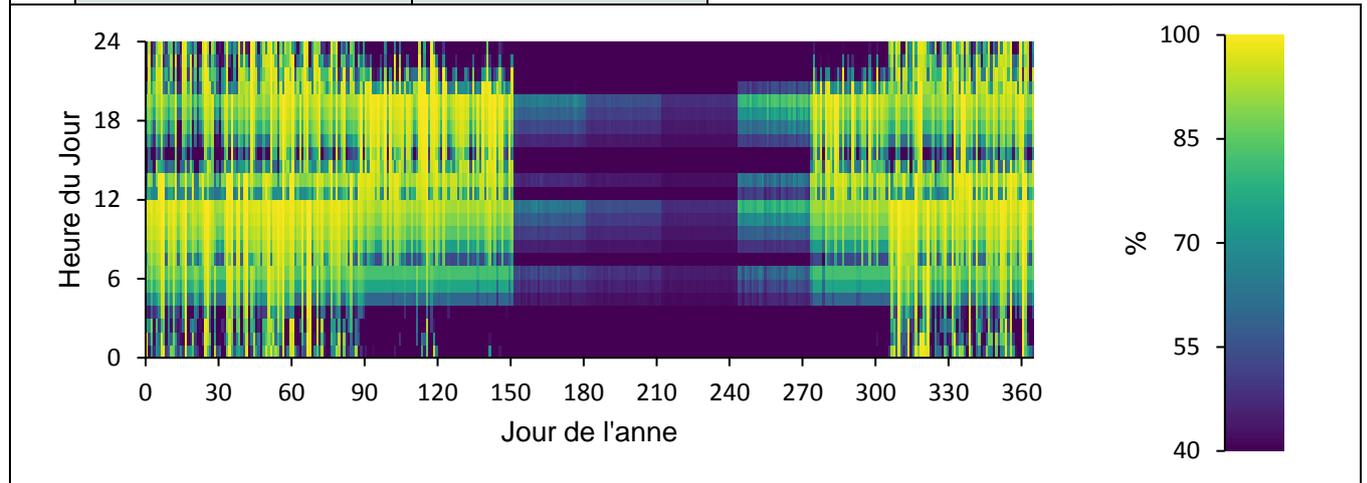


Fig.IV.13 Puissance chargée par batre (jour /Anne)

IV.5.5 Résultats économiques

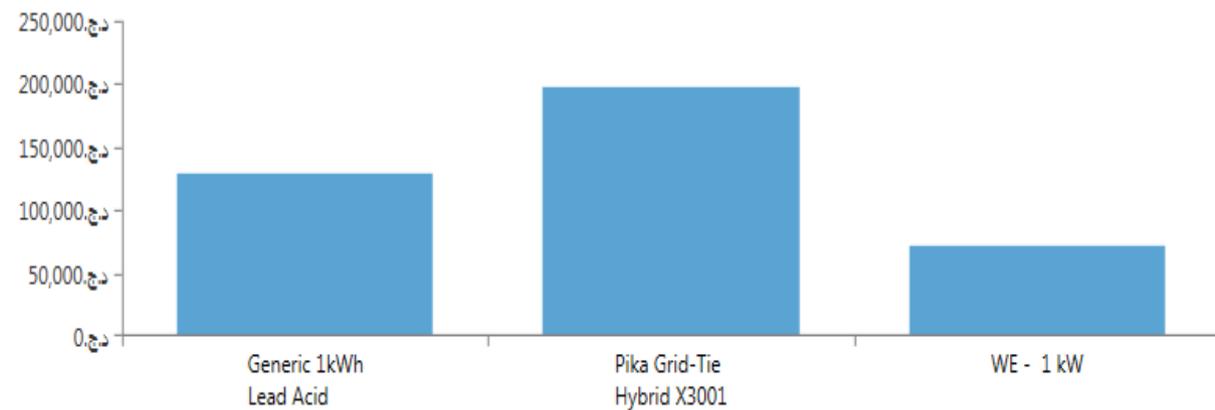


Fig.IV.14 le coût de l'installation éolienne

Tableau.IV.3 montre le coût de l'installation éolienne et le coût de chaque composante de la première année à 25 ans

Composant	Capitale (DA)	Remplacement (DA)	Maintenance (DA)	Total (DA)
Une éolienne	51,051.39	16,275.56	12,927.52	71,082.14
Une batterie	24,000.00	101,385.77	6,463.76	128,945.36
Une onduleur	91,066.51	80,451.58	36,197.05	196,807.29
System	166,117.90	198,112.91	55,588.32	396,834.79

Cout totale d'éolien: 396,834.79 DA.

Cout de kWh d'éolien: 12,46 DA.

Cout d'opération d'éolien: 17,846.96 DA.

IV.6 Etude installation réseau électrique (sonelgaz)

Pour Doter le site isole de El Kherrouba 500m du réseau électrique dont nous avons besoin :

-chaque 50m en à installer Support béton (poteau électrique) type de (11-400) BT prix de 1 potto 92 963,91DA.

-forfait barrée y compris 3384,00DA le mètre (au de la 50m) type de câble 3*70 torsade.

-le cout d'installation totale 2 621 630,00 DA.

Tableau.IV.4 Etude installation réseau électrique (sonelgaz)

PROJET DE 25 ANS		
Besoin de site isole	poteau électrique	câblage
		10 poteau
Prix unitaire	92 963,00 DA	3 384,00 DA
Prix total	929 630,00 DA	1 692 000,00 DA
Cout globale	2 621 630,00 DA	
Cout annuel	104 865,20 DA	
Cout mensuel	8 738,77 DA	

IV.7 Comparaison entre installation système éolienne et réseau électrique (sonelgaz)

Tableau.IV.5 comparaison économique de deux système

Comparaison économique entre deux système		
Consommation par jour	11.26 kWh/jour	
Prix de kWh d'éolien	12,46 kWh/da	
Prix de kWh de sonal gaz	4,7 kWh/da	
Prix de kWh	Jours	Mois
Prix de kWh d'éolien	140,30 DA	4 208,99 DA
Prix de kWh sonal gaz	52,922 DA	8 791,69 DA
Prix de sonal gaz réel	780,79 DA	

Après les études, nous notons que les résultats de chaque système dimensionné pour le pompage de l'eau pour l'irrigation sur une ferme agricole après 25 ans indiquent que le coût du réseau électrique (Sonelgaz) est beaucoup plus élevé que le coût du système éolien.

Conclusion

Grâce à la comparaison et aux résultats obtenus avec les deux systèmes, le système éolien est bien le meilleur que le système réseau électrique (sonelgaz) pour pomper l'eau pour l'irrigation sur une ferme agricole, notamment en termes de coûts économiques.

Conclusion générale

Depuis des générations, l'homme recourt aux ressources fossiles pour produire de l'énergie. Toutefois, charbon, pétrole et gaz existent en quantités limitées et leur combustion accroît les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'origine du réchauffement climatique. De là l'idée d'exploiter des sources d'énergies dites « renouvelables » car inépuisables (ou presque). L'énergie éolienne et l'énergie solaire sont deux énergies renouvelables utilisant les ressources naturelles (vent et soleil). La première emploie des éoliennes et la seconde des panneaux solaires ou panneaux photovoltaïques afin de produire de l'électricité, notamment dans des sites isolés.

Nous avons étudié la possibilité d'irriguer un champ d'agricole avec un système éolien dans la région de El kharrouba qui possède un gisement éolien jugée acceptable pour des petites applications, Sur ce travail nous avons représenté les généralités sur l'énergie renouvelable notamment l'énergie éolienne, ainsi que les différents types d'éoliennes. Ensuite on a passé au principe de fonctionnement et choix d'éolienne.

Dans le cadre de notre étude sur d'une éolienne à axe horizontale, nous avons pu réaliser le dessin et la conception assistés par ordinateur de l'ensemble de la structure de l'éolienne à l'échelle réelle. Cette structure qui est constitué plusieurs pièces mécaniques différentes, a été conçu, fabriqué et monté de façon à assurer un fonctionnement optimal et une fiabilité maximale.

Notre objectif principal étant modéliser géométriquement la structure de l'éolienne et de simuler numériquement sous des conditions de fonctionnement (des vents de 8,72 m/s). Cette étude a été concept par le logiciel de "SOLIDWORKS" et modélisation par le module d'analyse "Matlab Simulink".

En résumé SolidWorks est principalement utilisé pour la conception et la modélisation 3D, tandis que MATLAB est utilisé pour les calculs numériques avancés, l'analyse de données, le traitement du signal et de l'image, ainsi que l'apprentissage automatique. Ces deux logiciels sont très puissants dans leurs domaines respectifs et peuvent être complémentaires pour des projets d'ingénierie et de recherche plus avancés.

Nous avons étudié d'irriguer un champs d'agricole avec un système éolien dans la région de El Kharrouba par logiciel de simulation Homer et nous avons comparé les résultat énergétique et économique un système éolien par rapport le réseau électrique(Sonelgaz).

Nous concluons que le choix de placement des éoliennes à axe horizontal dans les régions à petit vents ou dans les zones urbaines sont plus avantageux.

Bibliographe

- [1] VIOLLET Pierre-Louis, Histoire de l'énergie hydraulique, Presse de l'école nationale des Ponts et chaussées ,2005.
- [2] science-energie.chez-alice.fr. (n.d.). Hydraulique. [online] Available at: <http://science-energie.chez-alice.fr/energie/hydro.htm>.
- [3] Traoré M. “ Gestion du système photovoltaïque d'une alimentation privée connecté au réseau “, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2017.
- [4] FPGA en utilisant la carte ML605 ‘’, Université Mohamed Boudiaf M’sila, 2018.
- [5] T. Chow, «A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology,» Applied energy, vol. 87,n° %12, pp. 365-379, 2010.
- [6] Les énergies renouvelables de la préhistoire à nos jours. (n.d.). Available at: http://www.astrolabium.be/IMG/pdf/dossier_pe_da_e_nergies.pdf [Accessed 30 Mar. 2023].
- [7] Noureddine Moumami, Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire, November 2015.
- [8] : M.Orgeret, «Les piles solaires, le composent et ces applications» Préface de F.Allest.
- [9] C. DARRAS, “ Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE’’, Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.
- [10] 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.
- [11] S. BELAKEHAL « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » Thèse de Doctorat, Université de CONSTANTINE 2010.
- [12] L.PROTIN and S.ASTIER, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique d'ingénieur, D 3360,1996.
- [13] H. KANCHEV:«Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain » Thèse de Doctorat, PRES Université Lille Nord-de-France2014.
- [14] Contributeurs aux projets de Wikimedia (2004). technologie qui vise à exploiter les phénomènes thermiques internes du globe terrestre. [online] Wikipedia.org. Available at: <https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9othermie>.

- [15] B. Multon, «Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan,2008.
- [16] H. Bateau. Dans l'air du temps, l'énergie éolienne. Les Energies Renouvelables Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. (ADEME) , (2011).
- [17] L. Chang, 'Systèmes de Conversion de l'Energie Eolienne', IEEE Canadian Review, pp. 1 – 5,2002.
- [18] B.BOUKHEZZAR, « Stratégies de Commande pour L'optimisation et la Régulation de Puissance des Éoliennes à Vitesse Variable ». Thèse de Doctorat de l'université de Paris XI France, 2006
- [19] A. RAMLI, « Contribution à l'amélioration des performances d'un aérogénérateur basé sur MSAP». Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2010.
- [20] Hernandez, J and Crespo, A., 1987, " Aerodynamics Calculation of the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines and Comparison with Experimental Results ", "Wind Eng, ", 11(4), pp. 177–187.
- [21] www.neal-dz.net,consultéle01/03/2011.
- [22] N. MEKKAOUI, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée ». Mémoire Magister, Université Batna, 2004.
- [23] L.KHATTACHE, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentée ». Mémoire Magister, Batna, 2007.
- [24] Mr Mahri Zine Labidine, «Etude Dynamique et Optimisation des Pales d'un Aérogénérateur», Thèse préparée pour l'obtention d'un diplôme de Doctorat d'état. Université de Mentouri constantine.
- [25] [Gstatic.com.\(2023\).Available at: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSDHCTpBCIJ0AiZoyq6Xf48eGsSgfA1nvc4pw&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSDHCTpBCIJ0AiZoyq6Xf48eGsSgfA1nvc4pw&usqp=CAU) [Accessed 5 Jun. 2023].
- [26] N. CHERFIA. Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens,(2010). Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri – Constantine.
- [27] M. Sathyajith, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006.
- [28] Kerikeb Mohamed, Thème : Modélisation, Simulation et Commande d'une Eolienne Contrarotative. Mémoire de MAGISTER U. Skikda, Année universitaire 2011/2012.
- [29] A. Boyette. Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne. thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy,(2006).

- [30] M. Khechana, M. Nadjah, L. Laiche ,T. Ouksel ,C. Mahfoudi. Etude de la nacelle et du mat d'une éolienne de faible puissance. Revue des Energies Renouvelables 195 (2008) 195–203.
- [31] <http://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>.
- [32] 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).
- [33] BOUCHAKER Amir Abderaouf, BENBRINIS Mouad, " Structure et Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé ", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2018.
- [34] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.
- [35] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation »,conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [36] N. ZIDANE, «Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Energies Renouvelables ».Mémoire Magister, université farhat abbas setif ,2014.
- [37] Contributeurs aux projets Wikimedia (2006). Petit éolien. [online] Wikipedia.org. Available at: https://fr.wikipedia.org/wiki/Petit_%C3%A9olien [Accessed 1 Apr. 2023].
- [38] Wikipedia Contributors (2019). Small wind turbine. [online] Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Small_wind_turbine.
- [39] Portal, E.-E.E. (2011). Large and Small Wind Turbines are Different. [online] EEP - Electrical Engineering Portal. Available at: <https://electrical-engineering-portal.com/large-and-small-wind-turbines-are-different>.
- [40] 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.
- [41] H. Daaou Nedjari, S.Kheder Haddouche, A.Balehouane, O.Guerri ; Optimal windy sites in Algeria : potential and perspectives ; Energy ; in press ; 2018.
- [42] Les meilleures éoliennes domestiques. (2020). La raison scientifique pour laquelle les éoliennes ont 3 pales. [online] Available at: <https://www.eoliennedetoit.com/raison-scientifique-eoliennes-3-pales/> [Accessed 28 May 2023].
- [43] O.A. Ajayi application of automotive alternators in small wind turbines.

- [44] Shahaboddin Shamshirband , Dalibor Petkovic, Hadi Saboohi, Nor Badrul Anuar, Irum Inayat, Shatirah Akib, Z̄ arko ojbašic, Vlastimir Nikolic, Miss Laiha Mat Kiah, Abdullah Gani Wind turbine power coefficient estimation by soft computing methodologies: Comparative study.
- [45] Yuri Carrillo Retrofitting a Car Alternator for Low-Speed Power Generation.
- [46] Onur TAŞKIN, Gülşah ÜĞLÜ, Hakan BÜYÜKCANGAZ, Ali VARDAR.
The Determination of Wind-Powered Irrigation Potential In Turkey. Jul 2014, AGRICULTURE FOR LIFE, LIFE FOR AGRICULTURE, Bucharest, Romania.
- [47] P. Salvi, W. Eddi ; « Généralités sur les énergies éoliennes ».France, Novembre 2002.
- [48] H. Bureau ; « Dans l'air du temps, l'énergie éolienne » ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie). France,Décembre 2011.
- [49] globalwindatlas.info. (n.d.). Global Wind Atlas. [online] Available at: <https://globalwindatlas.info/fr>.
- [50] CDiscount. (n.d.). Cdiscount.com. [online] Available at: <https://www.cdiscount.com/jardin/arrosage/trotec-pompe-de-puits-tdp-370-e-de-700-w-au-debit/f-163271503-tro4052138087695.html> [Accessed 18 Jun. 2023].