REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
&
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Dr :Yahia Farés de Médéa

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DU GENIE DE LA MATIERE



Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option **:** Conception mécanique

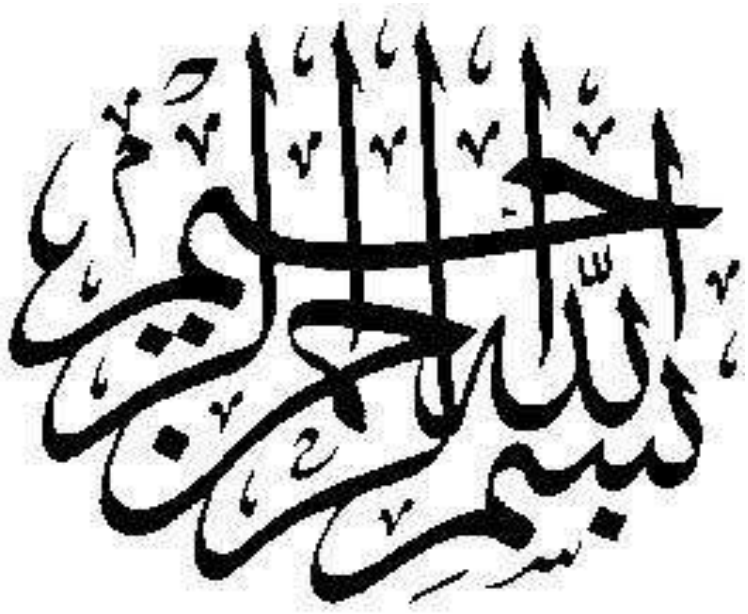
Thème :

ÉTUDE ET CONCEPTION D'UNE POMPE ÉOLIENNE

Présenté par :
Kouismi Salah
Brahim Belhaouari Azedine

Encadré par :
Dr : Bachene Mourad
Co-encadreur.Mr: Smari Ali

2013/ 2014


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

Nous remercions tout d'abord (ALLAH)

A monsieur BACHENE MOURAD notre encadreur

et tous les Enseignants du département de mécanique Surtout Mr : Redha Rebhi et Professeur Abdallah el Hadj Abdallah

Atouts les travailleurs de l'administration surtout (Mr :Bouhraoua Ismail)

Tout les équipes de l'unité maintenance (POVAL) Surtout (Mr : Razouk .A)

Et tous ceux qui nous ont aidés

Enfin nous souhaiterons témoigne notre profonde gratitude à toute personne ayant contribué de prés ou de loin à l'élaboration de ce travail

Dédicaces

À mes très chers parents

À mes frères et sœurs

À ma famille

À mes amis

Belhaouari. A

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à

- ✓ Ma très chère mère
- ✓ Mon très cher père
- ✓ M'âme grand mère et mon frère Mohamed mes chers condoléances
- ✓ Mes frères et ma sœur
- ✓ Aoute la promotion 2ème Année Master Conception Mécanique 2014
- ✓ Mon amis mon frère Redha Rebhi et Azedine et hadjaj M
- ✓ Tous les professeurs surtout encadreur (Bechene Mourad)
- ✓ Tout Jaloux de la religion de l'islam
- ✓ Pour tous ceux qui consacrent le fruit de mon travail.

K.SALAH

Résume

Le but de ce travail est la conception d'une éolienne à l'aide du logiciel solidworks. La conception se fera en trois grandes étapes. La première consiste à rassembler des informations sur les différences technologies éoliennes. La seconde est une étude aérodynamique de l'hélice permettant de déterminer la vitesse du vent minimale. La dernière étant un calcul dynamique des organes constitutifs de la pompe éolienne et simulations par le logiciel solidworks pour obtenir la forme finale de la conception.

Most clés

Pompe éolienne , conception , simulation numérique, solidworks , technique d’assemblages.

Abstract

The purpose of this work is the conception .using solidworks . The conception will be made in three big stages. The first one consists in gathering information on the various wind technologies. The, second is an aerodynamic study of the helix allowing to determine the speed of blow minimal. The last one being a dynamic calculation of the constituent organs of the wind pump and the simulations by the software solidworks to obtain the shape final of the conception.

Keywords

Aerodynamic wind pump, numerical simulation, solidworks technical Assemblies.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تصور توربنات الرياح بالاستعانة ببرنامج الحاسوب يتم انجاز العمل وفق ثلاث مراحل الأولى تتمثل في جمع معلومات حول مختلف التقنيات المستعملة في الانجازات السابقة لتوربينات الرياح.
المرحلة الثانية هي دراسة الايرو ديناميكية للدوار التي بإمكاننا من خلالها تحديد السرعة الدنيا٠ أخر مرحلة تتمثل في الحساب الديناميكي للأجزاء المكونة للتوربنة بالاستعانة ببرنامج solidworks للتحقق من صحة الفرضيات المسهلة للحساب اليدوي

الكلمات المفتاحية

مضخة الرياح , طرق التجميع

SOMMAIRE

Titres	**pages**
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Nomenclature	
Résume	1
Introduction générale :	2
Chapitre I : Généralités sur les éoliennes.	3
I.1. Introduction :	6
I .2. Historique des éoliennes :	7
I .3. Principe physique d'une éolienne :	9
I .4. Classification des éoliennes ou aérogénérateurs :	9
I .4.1. Aérogénérateur ou éolienne à axe perpendiculaire :	9
I .4.2. Aérogénérateur ou éolienne à axe horizontal :	11
I .5. Orientation des éoliennes :	12
I .5.1. Éolienne à rotor face au vent (Amont) :	12
I .5.2. Éolienne à hélice sous le vent (Aval) :	12
I .6. Description d'une éolienne à axe horizontal :	13
I.6.1. La Nacelle :	14
I.6.2. L'arbre :	15
I.6.3. Les pales :	15
I.6.3.1. Longueur :	16
I.6.3.2. Largeur :	16
I.6.3.3. Le profil :	16
I.6.3.4. Les matériaux :	16
I.6.3.5. Le bois :	17
I.6.3.6. Le lamellé-collé :	17
I.6.3.7 Les alliages d'aluminium :	17
I.6.3.8. Les matériaux composites :	17
I.6.3.9. Nombre de pales :	17
I.6.4. La boîte de vitesse ou multiplicateur :	18

I.6.5. Le mât ou la tour : 19
I.7. Positionnement d'une éolienne : 19

I.8. Type d'installation et durée de vie des éoliennes : 20
I.9. Avantages et inconvénients des éoliennes : 21
I.10. Éolienne type Stormblade Turbine : 25
I.11. Le Pavillon éolien : 26
I.12. La Transformation House : 27
I.13. La passerelle éolienne : 27
I.14. Éolienne sphérique : 28
I.15. Conclusions : 29

Chapitre II : choix du site pour l installation des éolienne. 30
II.1. Introduction : 31
II.2. Critères généraux de localisation d'un site éolien sur des terres fermes : 31
II.3. Critères de localisation des sites éoliens en pleine mer : 32
II.4. Les ressources éoliennes de l'Algérie : 33
II.5. Estimations des ressources éoliennes : 33
II.6. Autres sites étudiés : 37
II.7. Donnée météorologique de la wilaya de Tlemcen et d'Adrar : 38

Chapitre III : conception mécanique de la pompe.
III.1. Introduction : 41
III.2. Schéma mécanisme et organes constitutifs: 41
III.3. Calcule dynamique : 42
III.3.1. Les pales : 42
III.3.2. L'arbre: 44
III.3.3. Montage pales –moyeu: 46
III.3.3.1. Calculs du diamètre de la tige: 46
III.3.3.2. calcul du couple de serrage : 47
III.3.4. résistances à la traction, cisaillement et matage: 48
III.3.5. montage moyeu-arbre: 49
III.3.5.1. montages par clavette: 49

III3.6. la tour 50
III3.6.1. résistances à la flexion-compression: 51
III3.6.2. vérifications au flambement : 52
III.4.Calcul d'engrenage 53
III.4.1. Schéma cinématique d'engrenage 53
III.4.2 Extraction du module M , Nombre des dents Z , les n 2 diamètres primitifs d_1 et d_2 53
III.5. vérification des calculs dynamiques par solidworks: 54
III.5.1. 1a tour: 54
III.5.2. la pale: 56

Tableau **LISTE DES TABLEAUX** page

II. 1 :	Nombre de maisons pouvant être alimenté par un système de 200kW.	37
II. 2:	Stations météorologiques au sol implantées dans la région d'étude	39
III.1 :	Calculs d'engrenage	54

Nomenclateur

P : Puissance [KW]
U : Vitesse [m/s]
A: Air d'une section [mm^2]
P: Pression [N/mm^2]
a: Entraxe d'engrenage
a': Facteur d'indiction de rotation
C_p: Coefficient de puissance
c: Corde [m]
T: Poussée [N]
F: Coefficient de perte en bout de parle (facteur de prandtl)
Q: Couple [Nm]
B: Nombre de pale
R: Rayon [m]
r: Rayon [m]
M: Moment [Nm]
I: Moment quadratique [mm^4]
e: Epaisseur [m]
d: Diamètre [m]

Symboles grecs

Ω: Fréquence de rotation [rad/s]
ρ: Masse volumique [kg/m^3]
φ: Angle relatif de l'écoulement [deg]
α: Angle d'attaque [deg]
λ: Coefficient spécifique de vitesse
σ' : Solidité
σ: Contrainte [N/mm^2]
μ: Coefficient de frottement
η: Rendement
τ : Contrainte de cisaillement [N/mm^2]
θ_p: Section pitch angle-angle de lancement de section [deg]
θ_{p0}: Section pitch angle-angle de lancement de lame [deg]
θ_T: Section twist angle-section twist angle [deg]

Indices

D: Démarrage
N: Nominal

M: Maximale
I: Portance
d: Trainée
N: Normal
rel: Relatif
c: Centrifuge
t: Tangentielle
a: Axial
m: Moyeu
f: Flexion
adm: Admissible
p: Poussee
r: Rotor
a: Arbre

Acronymes

CS: Coefficient de sécurité

Introduction :

Ce mémoire entre dans le cadre du projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme « Master Conception mécanique » l'université de Médéa. Il est consacré aux énergies renouvelables (éoliennes).

Il est important de dire que le développement de l'énergie éolienne s'inscrit dans le cadre général de la lutte contre le réchauffement climatique. L'Union Européenne traduit cette volonté à travers une nouvelle politique énergétique qui préconise notamment l'utilisation des énergies renouvelables pour la production d'électricité et pompage d'eau.

Face aux 75000 MW (éolienne électricité horisentalle) installés aujourd'hui en chine et aux 68000 MW en États-Unis, l'Espagne accuse un important retard avec 5 100 MW fin 2012, bien que sa progression soit notoire depuis 2005. Ainsi, suite à la décision du Conseil Européen de décembre 2012 de fixer un objectif de 20% d'énergies renouvelables d'ici 2020 soit 25 000 MW éoliens, dont 6 000 en mer, ce qui correspond à la consommation de plus de 20 millions de foyers [1].

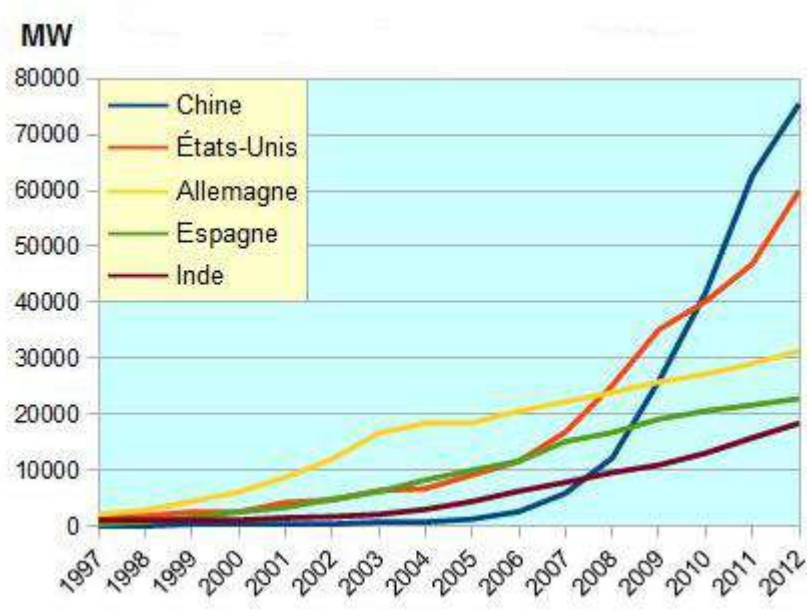


Fig I.1 **:** Évolution de la puissance installée éolienne au31. 12.2012

Principaux pays (MW)) (Wikipédia)

Principe général :

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement.

D'une manière simplifiée, l'énergie cinétique du vent captée par les pales de l'éolienne est transformée en énergie mécanique qui, fait tourner un bras (rotor) au bout duquel se trouve l'aimant qui tourne dans la bobine (stator), afin de produire l'énergie désirée.
En effets les pales captent l'énergie cinétique du vent puis la transmettent au moyeu d'un rotor, qui est relié à un multiplicateur grâce à un arbre lent (20 tours/min), le multiplicateur (75 fois plus vite que l'arbre) transfert sa vitesse à un arbre rapide qui entraîne la génératrice. Pour optimiser son fonctionnement, on trouve aussi toutes sorte de capteurs, comme un anémomètre (pour déterminer la vitesse du vent), une girouette qui permettent de la faire démarrer ou actionner ses freins, diriger la nacelle de l'éolienne face au vent (voir la Chapitre 1).
Le principes de l'éolienne moderne a emprunté beaucoup à l'aviation et les pales d'aujourd'hui sont réalisées en fibre de verre et en matériaux composites, notamment avec de la fibre de carbone (légère et résistante).
La plupart des éoliennes modernes sont à axe horizontal, et sont munies de trois pales, mais il exi ste des éoliennes à deux pales ou à une seule avec un contre poids. Il existe aussi d'autres variantes d'éoliennes, dont principalement le rotor Darrieus et le rotor Savonius qui tournent autour d'un axe vertical.

Contenu du mémoire :

D'après ce qu'on a vu précédemment, Ce mémoire propose mémoire étude et conception d'une pompe éolienne ainsi qu'un aperçu sur l'énergie éolienne. Ces éoliennes sont capables de fournir une puissance soit mécanique (dans le cas des éoliennes de pompage) ou électrique (dans le cas des aérogénérateurs).

Bien que les éoliennes lentes soient utilisées pour le pompage de l'eau pendant des siècles, nous avons choisie d'étudier dans le présent travail, un système de pompage par une éolienne lente, pour des simples raisons :

-L'éolienne lente ou multipale peut fonctionner à faible vitesses du vent.

-Le système de pompage mécanique est plus performant et moins couteux pour les faibles profondeurs.

Le présent travail consiste à étudier les performances d'un système de pompage éolien mécanique c'est-à-dire une éolienne multiple entraîner pompe à piston.

Un rotor éolien de plusieurs pales entraîne, par un système de bielle-manivelle, une pompe à piston plongée au fond du puit.

Ce mémoire est structuré comme suite : introduction, quatre chapitres et conclusion générale.

Dans l'introduction nous avons montré l'intérêt des énergies renouvelable et en particulier l'énergie éolienne.

- Le premier chapitre, est consacré à la présentation et aux modes de fonctionnement des éoliennes ainsi qu'un aperçu détaillé sur la classification des différents types des éoliennes qui existent.
- Le chapitre II tient compte des conditions et du choix du site sur lequel en général les éoliennes peuvent êtres installées et en particulier en Algérie. Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (périmètre de monuments historiques, sites classés..), terrain approprié, etc.
- Le chapitre III est une étude dynamique par le logiciel solidworks sur les organes constitutifs de la pompe éolienne et simulations pour obtenir quelque résultats par exemple (contrainte, déformation, déplacement…etc.).

- Le quatrième chapitre présente les dessins techniques des déférentes pièces de la pompe.
- Le mémoire se termine par une conclusion et des recommandations pour un travail futur.

Chapitre I :

GENERALITES SUR LES EOLIENNES

I.1. Introduction :

Au cours de la dernière décennie, la technologie de l'énergie éolienne a progressé de façon remarquable grâce à la diminution des coûts, la technologie et à l'amélioration et de la fiabilité, l'énergie éolienne peut maintenant concurrencer les sources classiques d'électricité dans certains cas, par exemple dans les collectivités éloignées simultanément à ces développements technologiques, le défi mondial du changement climatique a suscité à l'étranger un grand intérêt pour l'énergie éolienne en tant que source énergétique propre.

Les moulins à vent utilisés auparavant pour moudre le grain sont un exemple d'utilisations précoces de l'énergie éolienne. La production de l'électricité et le pompage de l'eau figurent parmi les utilisations modernes de l'énergie éolienne. Les machines actuelles de conversion de l'énergie éolienne sont appelées (aérogénérateurs) ou de façon plus générale (éolienne).

En bref, Le mot éolien vient du Grec *Αολος* (Éole) qui est le Dieu des vents.

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique produite par l'air en mouvement. Comme toutes les formes d'énergie, l'énergie éolienne tire son origine du soleil. Les vents sont causés par les fluctuations de la chaleur du soleil à la surface de la terre et dans l'atmosphère, Le soleil réchauffe l'eau et la terre, et la chaleur qui en est issue est absorbée par l'air ambiant. Lorsque l'air atteint une certaine température, il s'élève rapidement, générant ainsi une zone de basse pression au niveau du sol et, au-dessus, une zone de haute pression. L'air circule naturellement des zones de haute pression vers les zones de basse pression; le vent est le résultat de ce mouvement (Voir la fig. 1).

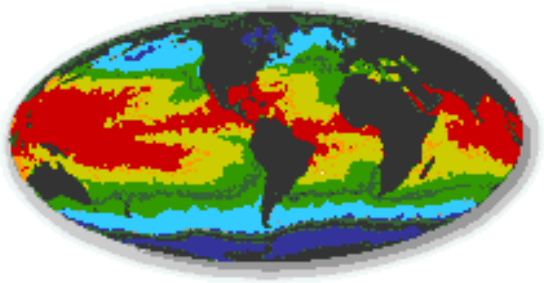


Fig I.2 : Températures des masses d'air autour du globe,
(les couleurs indiquent les différentes températures des masses d'air)

La quantité d'énergie éolienne potentielle dépend de la vitesse du vent (plus la vitesse est élevée, plus la quantité d'énergie produite est élevée) mais aussi d'autres facteurs tels que l'altitude (la vitesse du vent s'accroît en fonction de sa distance par rapport au sol), le lieu, la température de

l'air et les caractéristiques de la surface terrestre. Les régions côtières, les plaines rases, les sommets des collines et les cols de montagne sont souvent des endroits où les vents sont les plus favorables.
En effet, l'énergie éolienne est l'une des sources énergétiques les plus propres selon le conseil mondial de l'énergie, l'énergie éolienne pourrait, en 2020, répondre à 4,8% des besoins mondiaux en électricité.

I .2. Historique des éoliennes :

L'époque actuelle connaît sous la pression d'une crise des prix de l'énergie, une floraison de publications traitant des énergies dites nouvelles et dont pour la plupart en perse sur les plateaux de la province du seitan.
Ils consistaient en une roue à aubes à axe vertical entraînant directement une meule. Le premier niveau du bâtiment comprenant la roue à aubes était aubes était ouvert aux vents dominants, la moule, axée sur la roue, était placée au deuxième niveau. Ce n'est qu'en 1104 que sont mentionnés pour la première fois en Europe les moulins à vent : une bulle papale autorise l'abbé de Savigny à installer des moulins à vent dans les diocèses de Bayeux, Coutances et Évreux.
Début du 13ème siècle, les moulins à vent sont répandus dans presque toute l'Europe et particulièrement aux Pays-Bas ou ils étaient utilisés pour créer des polders. Ces moulines devaient être fixes ou sur pile avec tout le corps pivotante pour faire face aux vents changeants.
Fin 14ieme siècle apparaît le moulin à calotte pivotante.Des lors, il ne fallait plus bouger que la partie supérieure du moulin pour faire face aux vents changeants. Jusqu'au 19ieme siècle, les mouline éolienne ne connurent plus d'innovations déterminantes si ce n'est dans les systèmes de régulation.
Fin des années 1870, le nord-américain START Perry conçoit un aéromoteur qui connaitra le succès dans les exploitations agricoles aux fins de pompage et drainage, la roue (de 3m de diamètre) de ce moulin est dotée de100 à 150 ailettes, entraînait par l'intermédiaire d'un vilebrequin ou une pompe à piston.

Quelques années plus tard, ce type d'éolienne fut couplé à des générateurs d'électricité et deviendra ainsi un aérogénérateur. En1927, le français G. Darrieus brevetait une éolienne muni d'un rotor bipale à axe vertical de 20m de hauteur et 10kw de puissance. Actuellement, la majorité des éoliennes sont munies de rotor bipale, parfois tripale, à axe horizontal.

Le moulin à vent est l'ancêtre de l'éolienne (voir la **Fig I.3**) il est apparu au Moyen-âge en Europe. Il fonction à axe verticale dans les premiers temps puis, le moulin s'oriente vers le sens du vent et est muni de voiles pour mieux capter l'énergie du vent. (voir la **Fig** I.4)



Fig I.**3 :** Photographie de deux moulins à vent



Fig I.**4 :** Photographie d'un moulin à vent à voile

Au douzième siècle, le premier moulin à pales profilées est apparu. Bien que très simple, il s'agit de la première recherche aérodynamique des pales. Son utilisation est principalement de pomper l'eau ou moudre le grain. A la Renaissance, les inventeurs célèbres tels que Léonard de Vinci d'intéressent fortement au moulin à vent, ce qui conduit à de nombreuses innovations parfois sans lendemain. Dès lors, les moulins se multiplient en Europe. La Révolution Industrielle offre un nouveau départ aux moulins par l'apparition de nouveaux matériaux. En effet, l'utilisation de métal permet de modifier les formes des tours et augmente considérablement le rendement des machines que l'on nomme désormais « éoliennes » (voir la **Fig I. 5**)

L'avènement de l'électricité au XX^{ème} siècle fait place aux premiers modèles d'éoliennes modernes (voir **Fig I. 6**) le profil des pales est étudié et les ingénieurs s'inspirent des profils des ailes d'avion.



Fig I**. 5 :** Moulin à vent (Allemagne du Nord)



Fig I**. 6 :** Eolienne moderne

De nos jours, les éoliennes sont quasiment toutes à axe horizontal à l'exception de modèles à axe vertical tels que le rotor de Savonius et de Darrieus qui sont encore utilisés mais qui tendent à disparaitre. Les dernières innovations permettent aux éoliennes de fonctionner à vitesse variable, c'est-à-dire de régler la vitesse de la turbine éolienne par rapport à la vitesse du vent.

I .3. Principe physique d'une éolienne :

L'énergie que peut capter les éoliennes dépend en grande partie de la vitesse moyenne du vent à l'échelle locale. Les régions où l'on observe le potentiel le plus intéressant sont les cotes, les zones dégagées de l'intérieur ou les rives de plans d'eau. Certaines régions montagneuses présentent également un grand intérêt. Malgré les limites géographiques inhérentes au choix de l'emplacement des centrales éoliennes, il existe de nombreux endroits dans la plupart des régions du monde ou l'énergie éolienne pourrait satisfaire une grande partie de la demande locale en électricité ou bien en eau, via un system de pompe stockage. Les régions du monde où les champs éoliens sont les plus nombreux sont le Danemark, le nord de l'Allemagne et la Californie (USA), mais de nombreux parcs éoliens existent dans les îles des Shetlands (Écosse), dans la plaine du Pô (Italie) et en Galice (Espagne), où l'on peut en voir des centaines tout au long de la côte. En France elles sont surtout présentes en Bretagne dans l'Aude, la Meuse.

I .4. Classification des éoliennes ou aérogénérateurs :

En général il existe deux grands types de capteurs utilisés: statiques et dynamiques. Le premier type ne se rencontre que très rarement et nous n'en dirons pas grand chose. Le second, par contre est beaucoup plus intéressant.

La famille des capteurs dynamiques se décompose en deux groupes selon l'axe autour duquel tournera la partie mobile du capteur : horizontal et vertical. C'est le premier groupe qui est le plus

utilisé dans toutes les applications industrielles, à quelques exceptions près, qui seront expliquée dans ce qui suit.

I .4.1. Aérogénérateur ou éolienne à axe perpendiculaire :

Les mats (tours) des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal. Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

Le rotor de Savonius : dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

Le rotor de Darrieus : est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

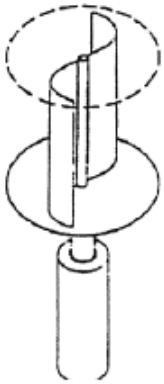


Fig I. **7 :** Rotor de Savonius (basé sur la trainée)

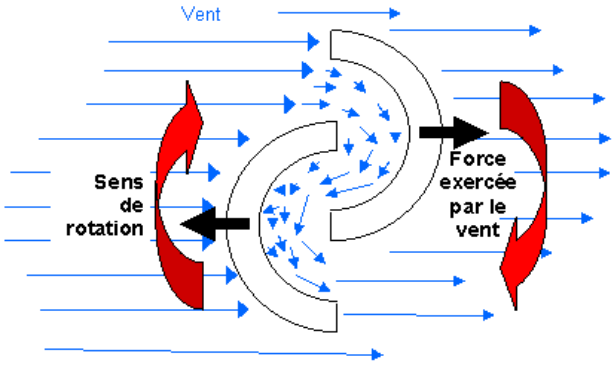


Fig I **.8:** Schéma de principe du rotor de Savonius

Fig I **.9 :** Rotor à axe vertical (VAWT)



Fig I **.9-1:** Rotor Darrieus (basé sur la portance)

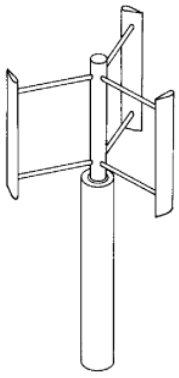


Fig I **.9-2:** Rotor en H

I .4.2. Aérogénérateur ou éolienne à axe horizontal :

C'est ce type de capteur qui sera quasi-exclusivement utilisé dans la plus part des pays industriels. Malgré quelques désavantages liés à son axe de rotation horizontal, comme l'obligation d'orienter le rotor toujours face au vent, les avantages sont suffisamment importants pour justifier sont emploi dans la production d'énergie au niveau industriel.

Nous ne parlons ici que des aérogénérateurs dits à marche rapide, l'autre type de capteur à axe horizontal, à marche lente, n'est pas très courant hors du contexte des pompages demandant peu d'énergie, ils n'interviennent donc pas dans la production d'énergie.

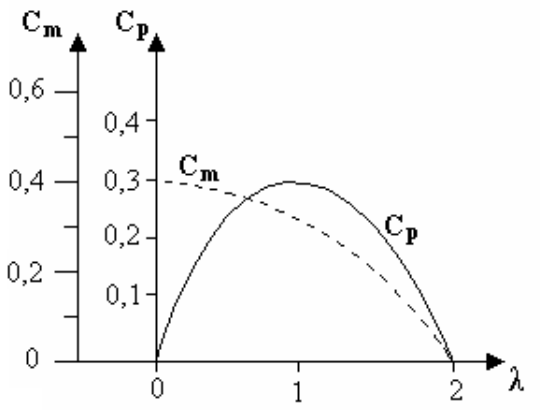


Fig I **.10** : Éolienne à marche lente

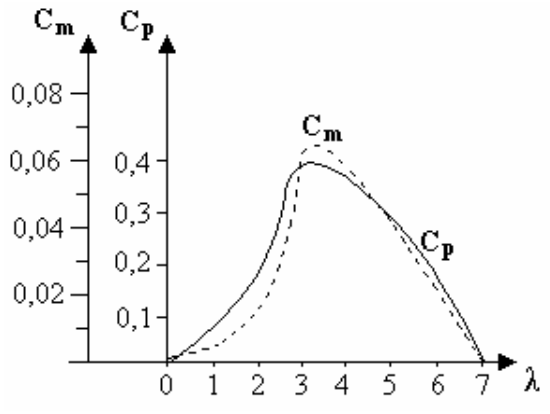


Fig I **.11** : Éolienne à marche rapide

Ce choix s'explique par l'allure des courbes caractéristiques du coefficient de puissance Cp et celui du couple Cm.

Il est cependant utile de noter que les principes constructifs entre ces deux types de récepteurs sont différents. En effet, l'éolienne à marche lente est constituée de lames d'acier ou de plastique, disposées en grand nombre autours de l'axe de rotation. Celles-ci ne sont pas de profil particulier (contrairement aux éoliennes à marche rapide, comme nous le verrons dans ce qui suit), et ne demandent donc quasiment aucune étude aérodynamique.

Nous noterons enfin que pour les capteurs à marche rapide, le couple au démarrage est très important, mais décroît très vite, il en est de même pour le coefficient de puissance. Ce qui explique le mauvais comportement de ce type de capteur lors de rafales de vent.

Fig I. **12:** Rotor a axe horizontal (HAWT), Upwind ou downwind

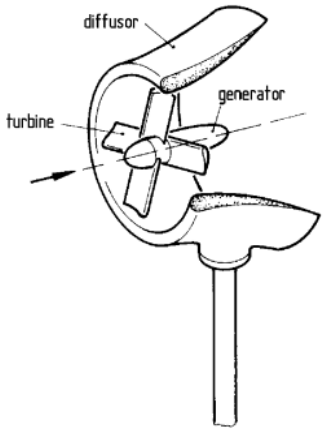


Fig I **.12-1:** Avec diffuseur

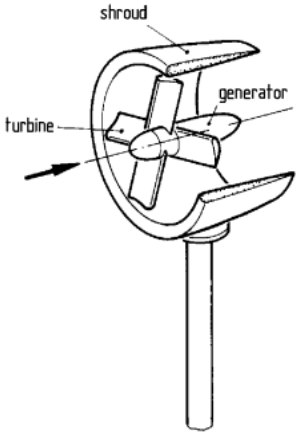


Fig I **.12-2:** Avec carter (Shroud)

I .5. Orientation des éoliennes :

Deux solutions sont encore en concurrence : l'éolienne à rotor face au vent et l'éolienne à hélice sous le vent.

I .5.1. Éolienne à rotor face au vent (Amont) : nécessite soit une dérive, soit une orientation actionnée par un servomoteur recevant des informations et commandes de la part d'une girouette.

Les capteurs à axe horizontal doivent toujours être orientés pour faire face au vent. Les dispositifs le permettant sont donnés dans le tableau ci-dessous.

I .5.2. Éolienne à hélice sous le vent (Aval) :

Un capteur placé à l'amont du support nécessite une gouverne mais soustrait les pales au sillage de ce support. Par contre s'il est placé en aval, la gouverne n'existe plus et les efforts de manœuvre

sont plus faibles. Cette dernière disposition est donc plus simple et donne une stabilité supérieure. Il est cependant utile, dans tous les cas, de monter un amortisseur.

La disposition roue aval est de loin maintenant la plus utilisée, même exclusivement dès que la puissance dépasse quelques kilowatts.

Les changements de direction et les variations de fréquence de rotation liés aux rafales sont à l'origine de vibrations néfastes au bon fonctionnement de la machine. Le dispositif d'orientation devra donc assurer le maintient du rotor face au vent sans provoquer lors des changements brutaux du vent des variations d'orientation rapides de la machine.

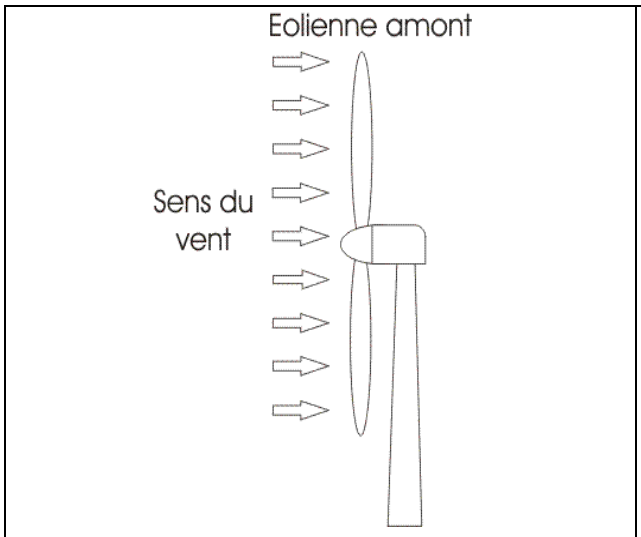


Fig I **.13 :** Schéma d'une éolienne à axe horizontal amont

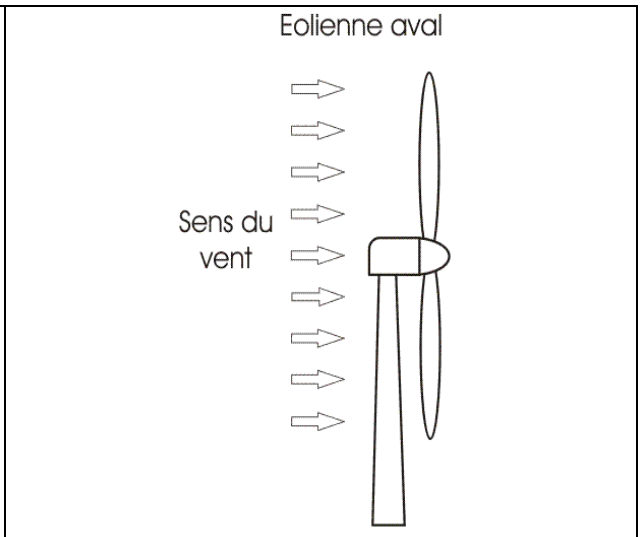


Fig I **. 14** : Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval

I .6. Description d'une éolienne à axe horizontal :

La plupart des grandes éoliennes modernes sont à axe horizontal. Leur allure élancée, presque frêle, démontre la résistance des matériaux modernes. Les dimensions sont beaucoup plus considérables qu'on ne l'imagine : la tour a 45 mètres de hauteur, mais le diamètre de l'hélice (ou rotor) atteignant presque la même taille, fait culminer l'ensemble à près de 60 mètres.

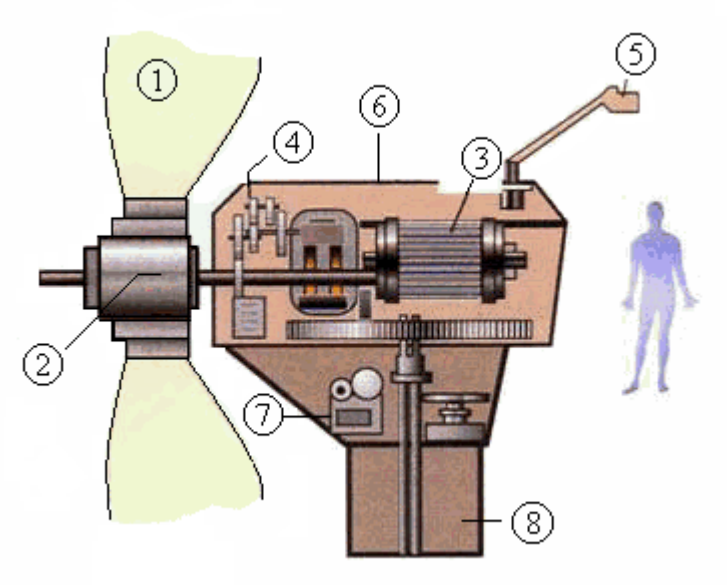


Fig I **.15 :** Organes d'une éolienne à axe horizontal

Les pales (1) d'une éolienne du type de celles de la centrale des Dunes, assemblées sur un rotor (2), tournent à une vitesse calculée pour fournir au générateur (3), par l'intermédiaire du multiplicateur (4), une puissance de 300 kW dans un vent de 47 km/h. Un système de calage variable des pales régule la puissance de l'éolienne au-delà de 300 kW et arrête l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint 90 km/h. Une girouette (5) permet d'orienter la nacelle (6) face au vent, par l'intermédiaire d'un groupe hydraulique (7) piloté par ordinateur. Cet ordinateur et les appareillages électriques sont logés dans la base du mât (8).

I.6.1. La Nacelle :

La nacelle est une véritable salle des machins perchées dans le ciel. Elle comporte une ou deux génératrices, une boîte de vitesses (sauf pour les systèmes Direct Drive), un système de freins à disque et différents équipements automatisés d'asservissement. On construit maintenant des éoliennes énormes de1 500 kW sur des tours de près de 50 mètres et qui sont surtout limitées non par la technologie, mais Par les grues gigantesques qu'elles nécessitent. Bien que la densité plus élevée de l'air froid et la recrudescence des vents en hiver soient des facteurs positifs pour l'exploitation d'une éolienne, les basses températures, la neige et la glace réclament, par contre, des adaptations pour les machines installées en zones montagneuses ou roides.

On remarquera que les grandes éoliennes n'ont aucune dérive qui leur permette de les orienter selon le sens du vent. C'est qu'elles sont beaucoup trop lourdes. La nacelle est donc orientée par télécommande. Un dispositif de mesure (anémomètre/girouette) est installé sur la tête de l'éolienne ou sur une tour à proximité. Les données recueillies en permanence sont transmises à un

microprocesseur qui les traite et actionne un moteur électrique situé près de l'axe vertical de la nacelle. C'est ce moteur qui fait tourner la nacelle lorsque la direction du vent change.



Fig I **.16 :** Nacelle d'une éolienne à axe horizontal

I.6.2. L'arbre :

Pièce imposante car elle subit des efforts élevés. Entre le rotor et la boîte de vitesse, c'est l'arbre lent. L'arbre rapide rejoint le multiplicateur à la génératrice. Pour les éoliennes sans engrenage, il n'y a qu'un arbre unique.

I.6.3. Les pales :

Composante cruciale de l'éolienne. Il existe très peu de fabricants dans le monde capables de construire ces pales qui sont maintenant en fibre de verre et en fibre de carbone. Elles sont tellement longues (30 à 40 mètres) qu'il faut des convois exceptionnels pour transporter ces ailes géantes. Le nombre de pales est plutôt fonction de l'apparence visuelle : on préfère les tripales. Mais une éolienne mono pale est tout à fait performante.

Si l'hélice donne l'impression de tourner très lentement, c'est qu'un multiplicateur relie le rotor au générateur. C'est d'ailleurs une source de problèmes, et surtout de perte de puissance. Deux grands fabricants, Enercon et Jeumont Industrie, adoptent un principe différent : le rotor est en prise directe avec un générateur adapté. Cela présente beaucoup d'avantages. Pour réguler la vitesse de rotation du rotor en fonction des vents, on fait varier l'angle de chaque pale. Ce mécanisme automatisé de pas variable est extrêmement coûteux, mais difficilement évitable pour le moment.

Les rotors multiples procurent un couple élevé au démarrage mais sont peu efficaces par vent forts. Le pas variable est le système le plus efficace car il permet une régulation constante et presque parfaite de la rotation du générateur en bout de ligne. Mais c'est un dispositif complexe, qui exige davantage d'entretien. On préfère donc souvent ne pas avoir à modifier l'angle des pales, quitte à perdre un peu en efficacité, au démarrage et dans les grandes vitesses de vent. La conception de ces pales est très particulière car elles doivent « décrocher » quand le vent atteint une certaine vitesse. C'est l'« effet Stalle ». Grâce à sa forme, la pale ne peut plus accélérer même si le vent augmente. Contrairement à une première impression souvent répandue, une pale s'use dans le vent à cause du frottement avec les particules de poussière, de sable ou de glace. Il est rare que la durée de vie d'un jeu de pales dépasse une quinzaine d'années pour une éolienne régulièrement en fonction. Mais ceci varie évidemment avec la hauteur de l'éolienne et son environnement.

Il est très important de dire, que la nature dépend du bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien.

Plusieurs éléments caractérisent ces pales : la longueur, la largeur, le profil, les matériaux et le nombre de ces pales

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat ...

I.6.3.1. Longueur :

Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent. Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30 m.

I.6.3.2. Largeur :

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

I.6.3.3. Le profil :

Il est choisi en fonction du couple désiré. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (≥ 100 kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice. Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

I.6.3.4. Les matériaux :

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère.

Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en oeuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

I.6.3.5. Le bois : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.

I.6.3.6. Le lamellé-collé : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.

I.6.3.7 Les alliages d'aluminium pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

I.6.3.8. Les matériaux composites : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

I.6.3.9. Nombre de pales :

Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage 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 .

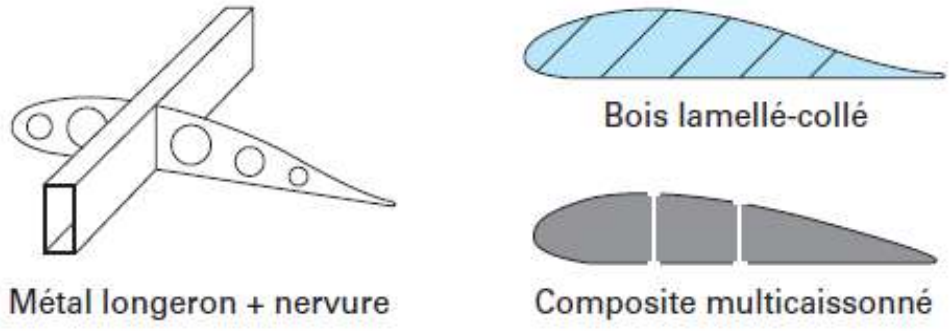


Fig I **.17 :** Exemples de structures de pale

I.6.4. La boîte de vitesse ou multiplicateur :

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur. 3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Leur utilisation se généralise ; cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.

- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

Remarque : *la plupart des petites éoliennes de moins de 15 kW n'ont pas de boîte de vitesse.*

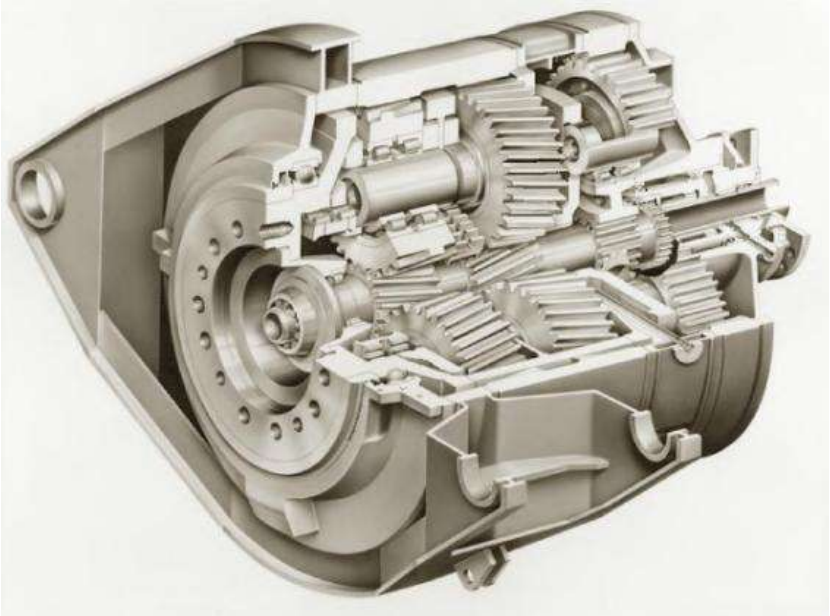


Fig I **. 18 :** multiplicateur d'une éolienne à axe horizontal de 2 à 3 MW

I.6.5. Le mât ou la tour :

Le mat est une tour cylindrique en acier d'une hauteur comprise entre 60 et 100 mètres, à l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de raccordement au réseau.

Pour les petites éoliennes, la solution la moins coûteuse est un tuyau en sections qui se trouve amplement haubané. La dimension du tuyau d'acier est surtout fonction du poids de l'éolienne, car ce sont les haubans qui assurent la stabilité de l'ensemble. Plus il y a de haubans et de structure porteuse, plus le bruit est élevé dans les grands vents.

Les tours en treillis sont les moins chères, mais souvent mal acceptées. À l'intérieur de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien. L'autre alternative est une tour autoportante, tubulaire et conique. Aucun hauban n'est alors nécessaire, c'est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubaner. La solidité de la fondation deviendra un élément important. C'est la solution pour les grandes éoliennes

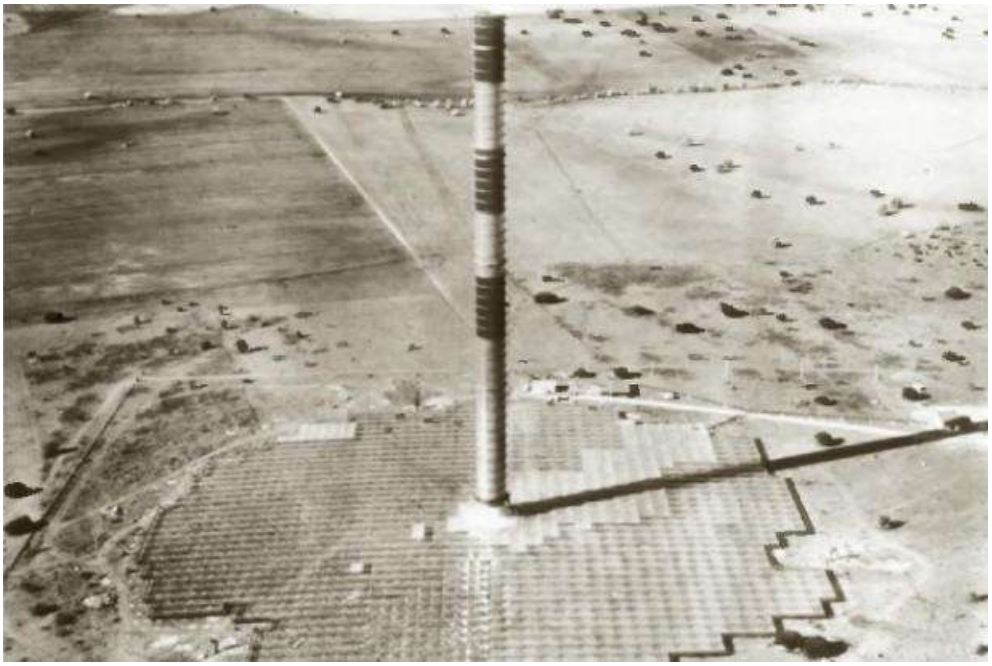


Fig I **. 19 :** Mat d'une éolienne à axe horizontal implantée à Manzanares, Espagne, 1985. Hauteur 200 m, Diamètre 10 m

I.7. Positionnement d'une éolienne :

La hauteur de la structure de support est un élément très important à considérer dans tout projet éolien. Une des règles à suivre est de positionner l'éolienne à au moins 10 m au-dessus de tout obstacle, et ce, dans un rayon de 100 m, (Fig 20). La majorité des petites éoliennes (< 300 W) sont installées sur des tours de 10 à 15 m, et les éoliennes de plus de 10 kW sont montées sur des tours de 27 m, voire de 40 m.

Remarque : *Les grandes éoliennes modernes, regroupées en centrales ou reliées au grand réseau électrique ont des rotors de 60 m de diamètre et sont montées sur des tours de 60 m de hauteur.*

La distance séparant deux éoliennes dépend de la disposition topographique, de la direction des vents dominants et du découpage parcellaire. Elle ne peut en tous cas descendre en dessous des valeurs suivantes :

- Pour deux éoliennes côte à côte, face aux vents dominants : 300 mètres ;
- Pour deux éoliennes l'une derrière l'autre par rapport aux vents dominants : 500 mètres.

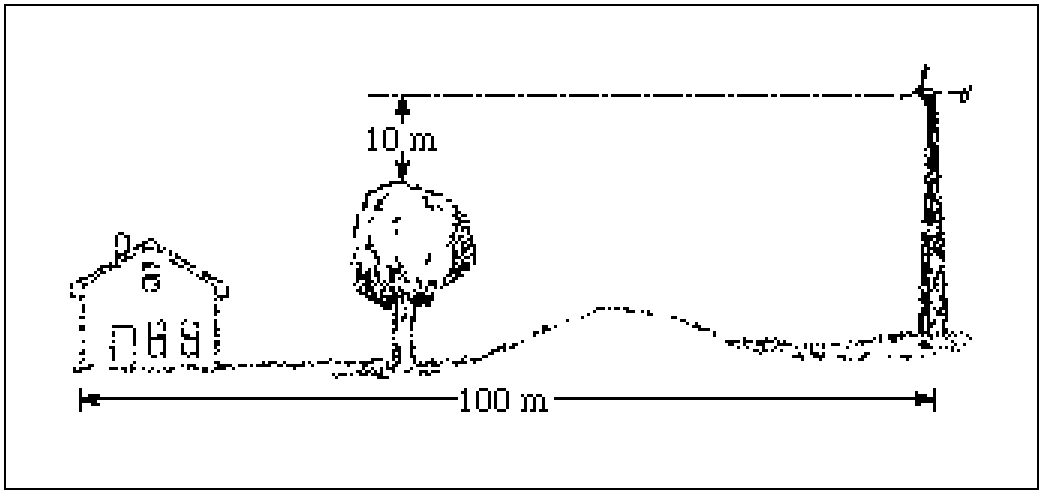


Fig I **. 20 :** Position d'une éolienne par rapport à une agglomération

I.8. Type d'installation et durée de vie des éoliennes :

Une éolienne occupe une faible surface au sol. Ceci est un énorme avantage pour son installation, cela permet de conserver des activités industrielles ou agricoles à proximité.

On retrouve l'éolienne dite individuelle installée en site isolé. L'éolienne n'est pas raccordée au réseau, elle n'est pas reliée à d'autres éoliennes, sinon les éoliennes sont regroupées sous forme de fermes éoliennes.

Un parc éolien (ou ferme éolienne) est constitué de plusieurs éoliennes implantées dans la même zone géographique. La distance qui les sépare varie entre 300 et 500 mètres au minimum entre deux éoliennes suivant le sens des vents dominants. Chaque éolienne fonctionne de manière totalement autonome et est pourvue d'un système informatique de commande qui oriente en temps réel la nacelle, fait démarrer et stoppe la rotation des pales, raccorde le générateur au réseau d'éoliennes. Toutes les éoliennes sont reliées entre elles électriquement et informatiquement, si bien que l'exploitant connaît à tout moment, et à distance, l'ensemble des paramètres de fonctionnement du parc éolien et peut ainsi agir en cas de problème.

Les interventions sur site (hors pannes) sont limitées aux opérations d'entretien et de maintenance, qui ont lieu tous les six mois en moyenne et durent trois à quatre jours par éolienne, sans nécessiter l'utilisation d'une grue automotrice.

Une éolienne moderne peut produire de l'énergie pendant 25 ans. Il est possible que son générateur et son rotor aient à être remplacés une fois durant cette période.



Fig I **. 21 :** Parc éolien (ferme éolienne)

I.9. Avantages et inconvénients des éoliennes

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres.

L'énergie éolienne est modulable et peut être parfaitement adaptée au capital disponible ainsi qu'aux besoins en énergie. Il n'y a donc pas d'investissements superflus. Cette modularité permet aussi de maintenir en fonctionnement la plus grande partie de l'installation lorsqu'une pièce est défectueuse.

Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre.

Le prix de revient d'une éolienne va probablement diminuer dans les années à venir suite aux économies d'échelle qui pourront être réalisées sur leur fabrication. Techniquement au point, les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées.

La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

I.9.1. Impacts des fermes éoliennes sur l'environnement

I.9.1.1. Les effets sur le paysage

Le problème environnemental le plus controversé associé aux fermes d'éoliennes est leur intrusion visuelle et l'impact qu'elles ont sur le paysage. Les turbines sont une présence verticale frappante dans le paysage, particulièrement dans les régions rurales où le potentiel éolien est souvent le plus

grand. Évaluer cet impact est souvent difficile car il s'agit d'une opinion subjective. Le design des fermes éoliennes et le type de paysages dans lesquels elles s'insèrent ont évidemment une grande importance. Il faut aussi savoir que la perception des gens d'une ferme éolienne n'est pas seulement déterminée par les paramètres physiques d'un paysage, mais aussi par leur attitude vis-à-vis des problèmes de pollution. Certaines études en Europe et aux USA ont montré que chez la majorité des gens, la perception de l'énergie éolienne comme une source d'énergie propre et renouvelable dépasse l'impact visuel. Il reste que le design des fermes éoliennes doit être conçu de façon à réduire cet impact visuel. Les facteurs à prendre en compte sont le choix soigneux de l'emplacement, la couleur et la forme.

I.9.1.2. Le bruit

Le bruit émis par les turbines éoliennes peut être classé en deux catégories que l'oreille humaine perçoit différemment. Premièrement, il y a le bruit produit par le passage de l'air dans l'hélice et deuxièmement, il y a le bruit produit par la rotation des éléments mécaniques tels les boîtes d'engrenages et génératrices. Le premier bruit est un sifflement rythmique. Bien que ce soit généralement le plus bruyant des deux catégories de bruit quand on le mesure en décibels, c'est le moins perturbant et le moins sujet aux plaintes, à l'opposé du grincement aigu de la seconde source. L'impact du bruit est facilement minimisé par un choix judicieux de l'emplacement de l'éolienne par rapport aux caractéristiques topographiques et à la proximité d'habitations. L'expérience montre que le bruit n'est pas excessif lorsque les habitations sont situées à plus de 300 mètres de la turbine la plus proche. Certaines normes ont été adoptées par plusieurs pays tels que la Suède :

45 dB (A) maximum au niveau d'une maison isolée dans la campagne.

40 dB (A) maximum au niveau d'une zone urbaine.

45 dB (A) maximum à une distance de 400 mètres de la turbine.

I.9.1.3.La perturbation de l'écologie locale des sites

Les fermes d'éoliennes peuvent avoir deux effets sur les oiseaux: la collision directe et la réduction de leur habitat. Des études hollandaises, danoises, suédoises, américaines et anglaises estiment que les possibilités de collision le jour, avec une bonne visibilité, sont négligeables. Il faut néanmoins éviter que les fermes soient situées sur les couloirs de migration et prendre des précautions dans des régions où vivent des espèces d'oiseaux menacées. Les perturbations sur l'habitat des animaux n'ont pas encore été suffisamment étudiées et les études disponibles à l'heure actuelle ne permettent pas de tirer des conclusions. Ce problème ne concerne pas seulement la vie des oiseaux, mais plus globalement celle de la faune et de la flore en général. La fragmentation du territoire peut aussi

avoir une influence sur le système hydrologique. L'importance écologique de chaque site doit donc être prise en compte lors de l'installation de fermes éoliennes; les gouvernements danois, néerlandais et grec, pour l'instant, essaient de choisir les sites en dehors des régions écologiquement sensibles. Dans d'autres pays, une étude de l'écologie et de l'ornithologie des sites est exigée préalablement à tout développement de ferme d'éoliennes. Cela suppose qu'il faille identifier les régions importantes d'un point de vue environnemental et établir les prescriptions pour réduire l'impact sur ces régions.

I.9.1.4. Vestiges archéologiques

La nécessité de vents forts et ininterrompus a pour effet que les fermes d'éoliennes sont souvent situées dans des régions rurales qui n'ont pas connu de développement important dans un passé récent. Dès lors, ces régions sont susceptibles de comporter des vestiges archéologiques préservés qui, quoique n'ayant pas de valeur environnementale en eux-mêmes, font partie de l'héritage culturel et de l'environnement humain. Les conflits peuvent généralement être évités en examinant attentivement les régions envisagées afin de ne pas positionner les turbines sur des vestiges. Dans le cas où la préservation physique du site n'est vraiment pas possible, l'excavation archéologique peut être une alternative acceptable.

I.9.2. Interférences électromagnétiques

Toute structure importante, particulièrement si elle contient une quantité substantielle de métal, est une cause potentielle d'interférences pour les signaux électromagnétiques tels que ceux des émissions radio et TV et des communications hertziennes.

La rotation de l'hélice de l'éolienne peut aussi causer des problèmes particuliers, parce qu'elle crée des signaux parasites intermittents qui interfèrent avec les trajectoires originales de transmission. Cependant, dans la plupart des cas, si des interférences électromagnétiques apparaissent, il existe des solutions bon marché et efficaces comme par exemple l'installation d'un récepteur ou transmetteur pour renforcer le signal original.

I.9.3. Sécurité

Les pales d'une hélice tournant entre 35 et 45 tours/minute, peuvent facilement être perçues comme une structure dangereuse. En fait, il y a peu de chance d'avoir des dégâts ou des morts suite à une cassure ou une fragmentation de l'hélice. Les dangers peuvent aussi être minimisés en éloignant les turbines des zones résidentielles, mais surtout en effectuant des contrôles sérieux lors de la

construction des turbines. Jusqu'à présent, ils ont prouvé leur efficacité dans la prévention des accidents.

I.10. Les éoliennes du futur :

En fouillant un peu, on se rend compte qu'on peut trouver pas mal de projets différents intégrant divers aspects naturels et notamment l'énergie éolienne :

I.10.1. Eolienne type Magenn Power Air Rotor System (MARS)

Le système de rotor d'air de Magenn (MARS) est un dispositif flottant dans le ciel rattaché au sol qui tourne autour d'un axe horizontal en réponse au vent, produisant efficacement de l'énergie électrique à un coût inférieur à tous les systèmes de concurrence. Le courant électrique développé avec le rotor flottant dans l'air est transféré en bas au niveau du sol grâce au fil avec lequel le dispositif est relié.

L'hélium (un gaz ininflammable plus léger que l'air) soutient le rotor qui monte en altitude pour capter des vitesses de vents plus importantes. Aucune tour ou base lourde n'est nécessaire et les tailles s'étendent de petits modèles de « baluchon » à de grands dispositifs En raison de la simplicité de conception, bas frais d'exploitation des capitaux et, le rendement plus élevé, MARS représente un large décalage par rapport aux éoliennes standard d'aujourd'hui. Encore au stade expérimental, une première éolienne de 4 kW a été installée en 2007, annoncée à 10.000 $ la pièce (la puissance peut sembler ridicule par rapport à une éolienne actuelle, cependant l'objectif est de créé des prototypes allant jusqu'à 1,6 MW).

-En mars dernier, des chercheurs de Harvard et du MIT ont lancé un prototype de baudruche volante avec une hélice de 4m de diamètre qui provient d'une turbine géante et un ballon gonflé à l'hélium pour aller capter le vent en altitude. La puissance de l'engin, qui a grimpé à 1.000 m se limite à 1,5 kilowatt, l'équivalent d'une éolienne domestique qu'on installe au fond de son jardin. Bien sur, c'est encore largement insuffisant mais François Cauneau, professeur à l'école des Mines de Paris garantit que «d'ici 2020, nous aurons atteint le stade industriel et nous pourrons déployer nos engins jusqu'à 600m d'altitude et ainsi couvrir une grande partie des besoins énergétiques de nos compatriotes». Gardons des yeux levés vers le ciel, et nous aurons peut-être de jolies surprises!

Avantage :

- aménagement au sol minimal
- aucune nuisance sonore
- très facilement déplaçable

- aucun risque pour la faune environnante
- aucune interférence électromagnétique

Inconvénients :

- liaison au réseau.
- problème d'esthétisme





Fig I **. 22 :** Eolienne type Magenn Power Air Rotor System (MARS)

I.10.2. Éolienne type Stormblade Turbine

Ce type d'éolienne comporte un mat plus petit que celle actuelle, un axe horizontal et sa particularité réside dans le fait que les pales de l'éolienne sont protégées par un carénage qui dirige le flux d'air à l'intérieur de la turbine, ce qui fait sa ressemblance avec un réacteur d'avion. Un des plus grands problèmes avec les éoliennes courantes est qu'une fois que le vent dépasse les 100km/h, elles doivent être arrêtées, parce qu'à des vitesses plus élevées, un effet gyroscopique est créé dans l'arbre d'entraînement et peut tordre le rotor. L'aérodynamisme de ce type d'éolienne permet de ne pas subir cet effet.

Mais le principal intérêt de ce type de modèle est de pouvoir convertir 70 % de l'énergie cinétique produite par le vent contre 30 à 40 % pour les modèles standards (limite de Betz), ce qui double presque la production d'énergie.



Fig I **.23 :** Éolienne type Stormblade Turbine

I.10.3. Le Pavillon éolien

Avec un design vraiment étonnant, une structure super légère , le vent fait tourner aléatoirement chacun des 6 segments autour d'une structure centrale ouverte sur chacun d'eux. Du coup, la forme du pavillon n'est jamais la même et même si les 6 étages ont la même forme, peu de chance de voir le buildind complètement aligné… Bien sur, l'effet de la rotation permet de générer de l'énergie qui sert ensuite à l'éclairage nocturne.



Fig 24 : Le Pavillon éolien

I.10.4. La Transformation House,

Alors là, c'est une "maison interactive", dont la forme peut changer pour subvenir à différentes fonctions. Les 5 sections peuvent tourner automatiquement ou manuellement autour de l'espace de

vie à l'intérieur pour laisser passer le soleil à l'intérieur et chauffer, laisser passer le vent et climatiser naturellement, recueillir l'eau de pluie pour subvenir aux besoins en eau, ou simplement pour profiter de telle ou telle vue. Elle aussi est faite à base de matériaux légers et peut etre partiellement recouverte de panneaux photovoltaïques.



Fig 25 : La Transformation House

I.10.5 . La passerelle éolienne

La passerelle est faite d'acier et d'aluminium. Le vent soufflant, 5 turbines éoliennes entrent en rotation autour de la passerelle pendant que les gens la traversent. 3 turbines tournent dans un sens, et deux dans l'autre afin de répartir les forces et ne pas trop jouer sur la structure. Pour couvrir le bruit, pendant que les turbines tournent dans différentes directions et à vitesses différentes, elles peuvent produire des sons électroniques correspondant. Ce projet a au départ été conçu pour être une sorte d'attraction architecturale lors d'évènements. Bien sur, elle est aussi apte à produire et stocker l'énergie électrique.

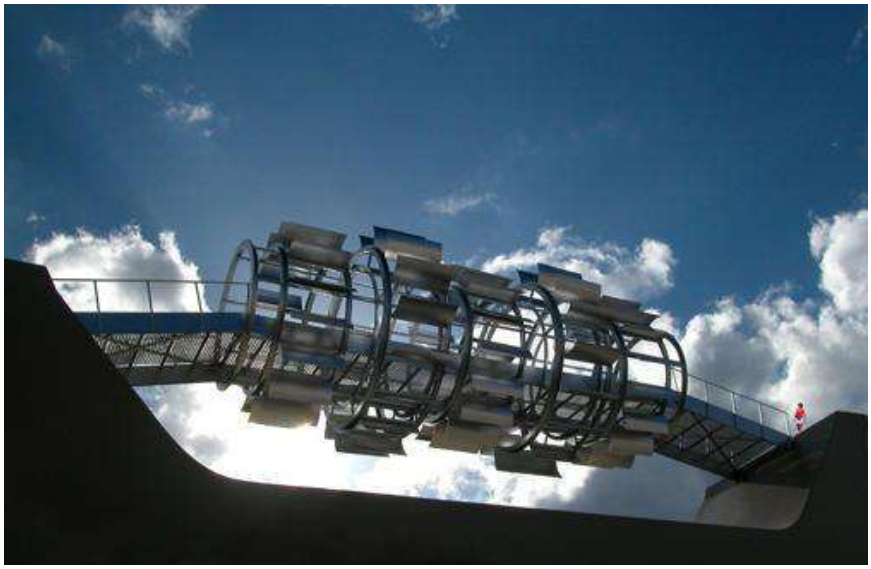


Fig 26 : La passerelle éolienne

Voilà, tous ces projets ont été conçu par le même designer architecte : Michael Jantzen, et je vous conseille d'aller voir son site très inspirant et très étonnant avec une multitude d'approches intégrant la plupart du temps des éléments naturels.

I.10.6. Éolienne sphérique :

La société néerlandaise Home energy a dévoilé récemment une éolienne du nom d'Energy Ball qui tourne à la manière d'une sphère sur un axe horizontal.

En adaptant le principe de Venturi, l'Energy Ball canalise l'air au travers de ses six lames et alimente ainsi le générateur. Cette éolienne sphérique possèderait des propriétés capables d'augmenter ses performances de rotation tout en abaissant le niveau sonore ; ce qui la rendrait idéale pour la production d'énergie à petite échelle.

L'éolienne sphérique peut être installée sur le toit des habitats individuels, des entreprises rurales et pourquoi pas des établissements publics. D'après les concepteurs, l'appareil peut atteindre jusqu'à six fois la vitesse du vent.

Le modèle V 200 génère jusqu'à 2 500 watt pour une vitesse de vent comprise entre 3 m/s et 40 m/s. Le diamètre de la turbine atteint quant à elle 1,98 m pour un poids de 90 kg.



Fig 27 : : Éolienne sphérique

I.11. Conclusions

Les effets des fermes éoliennes sur l'environnement local doivent être considérés très attentivement lors de leur planification. En général, les impacts peuvent être surmontés par des solutions techniques et esthétiques, qui n'affectent pas la viabilité des projets. Cependant, il est important de faire des évaluations pour prévoir les impacts potentiels, afin que des mesures appropriées puissent être prises quand c'est nécessaire. A une échelle régionale, des études mettant en relation les potentialités du vent avec les valeurs environnementales permettent d'identifier les régions privilégiées pour l'implantation de fermes éoliennes et celles où leur développement serait préjudiciable pour l'environnement.

L'analyse des sites est généralement entreprise sous la forme d'une évaluation de l'impact environnemental. La proposition est alors adaptée afin de minimiser les dommages environnementaux, ou rejetée si l'adaptation est insuffisante. De cette façon, le développement des fermes d'aérogénérateurs peut être favorisé tout en réduisant leurs nuisances; ainsi l'énergie éolienne restera une énergie vraiment positive à l’environnement.

Chapitre II :

CHOIX D'UN SITE EOLIEN

II.1. Introduction :

Au vu des potentiels énergétiques solaires, géothermiques et éoliens existants en Algérie, leurs utilisations pour le développement économique de certaines régions semblent favorables. De sa vocation agricole, et au vu des potentialités énergétiques éoliennes déterminés par certains études préalables, l'implantation d'aérogénérateurs est inévitable dans les temps à venir et cela dans un certain nombre de région en Algérie. Le choix d'un aérogénérateur passe inévitablement par la caractérisation éolienne du site d'implantation, d'où l'attention qu'il faut nécessairement apporter à l'estimation du potentiel énergétique local. Le but du présent chapitre est l'établissement d'une cartographie de vent dans diverse régions du territoire nationale pour choisir des éventuels sites éoliens.

II.2. Critères généraux de localisation d'un site éolien sur des terres fermes :

L'implantation d'une centrale éolienne dépend en général de cinq critères :

Le potentiel éolien : le gisement éolien en Algérie a fait l'objet de plusieurs études et d'une évaluation depuis une dizaine d'années afin de calculer :

- la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 et à 30 mètres de hauteur,
- la densité d'énergie éolienne à 10 et à 30 mètres de hauteur.

Certains sites en Algérie ont d'abord étés identifiés par une étude cartographique. Ensuite, des mâts de mesure de 10, puis de 30 mètres de haut y ont été implantés afin de quantifier le potentiel éolien. La campagne de mesure a duré plus de deux ans. Elle a confirmé les conditions éoliennes favorables du site.

Les impacts visuels, sonores et techniques : les impacts d'une centrale éolienne sont principalement de trois ordres :

- l'impact visuel et, plus largement, l'impact sur l'environnement : présence de zone naturelle, perception général du site…,
- l'impact sonore, compte-tenu de l'habitat à proximité (dans un rayon de 300 mètres) et du fonds sonore existant,
- les impacts de nature technique : sécurité, impact électromagnétique…

L’absence de conséquences dommageables pour les zones concernées, l’éloignement des habitations et un habitat de faible densité, l’absence de servitudes publiques (radiocommunication, ondes hertziennes, aviation…) font du site de la Haute-Lys un lieu d’exploitation adéquat.

Le terrain : ces contraintes sont triples :

• disponibilité des terrains,

• accès existants sur le site.

• distance du site au réseau.

La turbulence : Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence du vent. En effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à une valeur comprise entre 10 et 20 km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient à la destruction de l'éolienne ou à la nécessité de la « débrayer » (pâles en drapeau) pour en limiter l'usure. La vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent possible entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne. De même, l'axe de rotation de l'éolienne doit rester la majeure partie du temps parallèle à la direction du vent. Même avec un système d'orientation de la nacelle performant, il est donc préférable d'avoir une direction de vent la plus stable possible pour obtenir un rendement optimal (alizés par exemple).

La visibilité : le critère de visibilité prend en compte la capacité du site à présenter une image forte et cohérente en s’insérant dans le milieu paysager. Dans ce but, il faut chercher à limiter l’impact visuel des centrales, ou le modérer en profitant des obstacles visuels naturels (haies, talus…), ou humains (bâtis…).

II.3. Critères de localisation des sites éoliens en pleine mer :

À condition qu'elles soient implantées assez loin de la côte, les éoliennes en pleine mer (*offshore*) entraînent moins d'impact sur le paysage. L'installation d'éoliennes en mer est beaucoup plus coûteuse qu'à terre : les mâts doivent être étudiés pour résister à la force des vagues et du courant, la protection contre la corrosion (particulièrement importante du fait des embruns) doit être renforcée, l'implantation en mer nécessite des engins spécialisés, le raccordement électrique implique des câbles sous-marins coûteux et fragiles, et la moindre opération de maintenance peut nécessiter de gros moyens. En revanche, une éolienne offshore peut fournir jusqu'à 5 Mégawatt (à comparer aux

éoliennes terrestres limitées à 3 MW dans des sites bien ventés). Dans les zones où la mer est peu profonde.



Fig II.**1 :** Éoliennes en pleine mer, près de Copenhague (Danemark).

II.4. Les ressources éoliennes de l'Algérie :

Le domaine de l'énergétique éolienne a connu un grand essor avec l'élargissement de l'installation d'aérogénérateurs pour la production électrique dans les pays industrialisés. De plus, la volonté de réduire les émissions de gaz responsables de l'effet de serre, a poussé beaucoup de pays à s'intéresser davantage aux énergies renouvelables dont fait partie l'éolien. Par ailleurs, l'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

II.5. Estimations des ressources éoliennes :

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent, a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie [3]. Cette

représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses D'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers l'Algérie. La carte représentée en figure 2 montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Les cartes saisonnières représentées en figure 3 montrent clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventées que le reste des saisons et que le printemps en est la plus ventée. Néanmoins, on remarque que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver D'un autre côté des régions tels que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année.

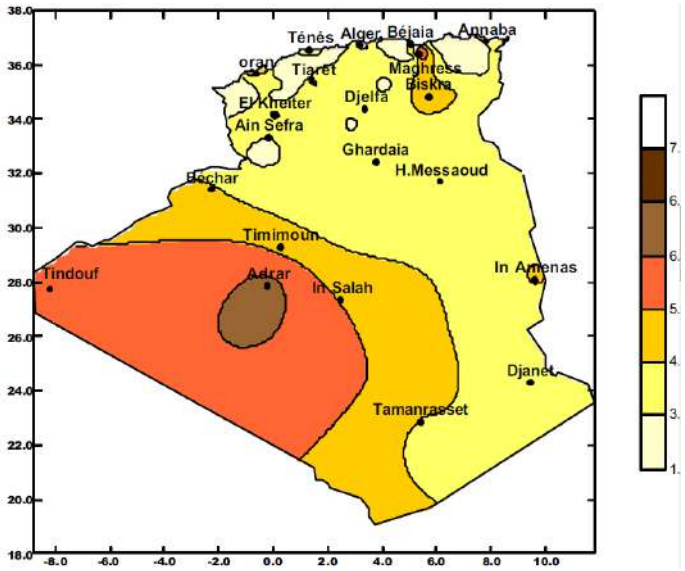


Fig II. **2 :** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

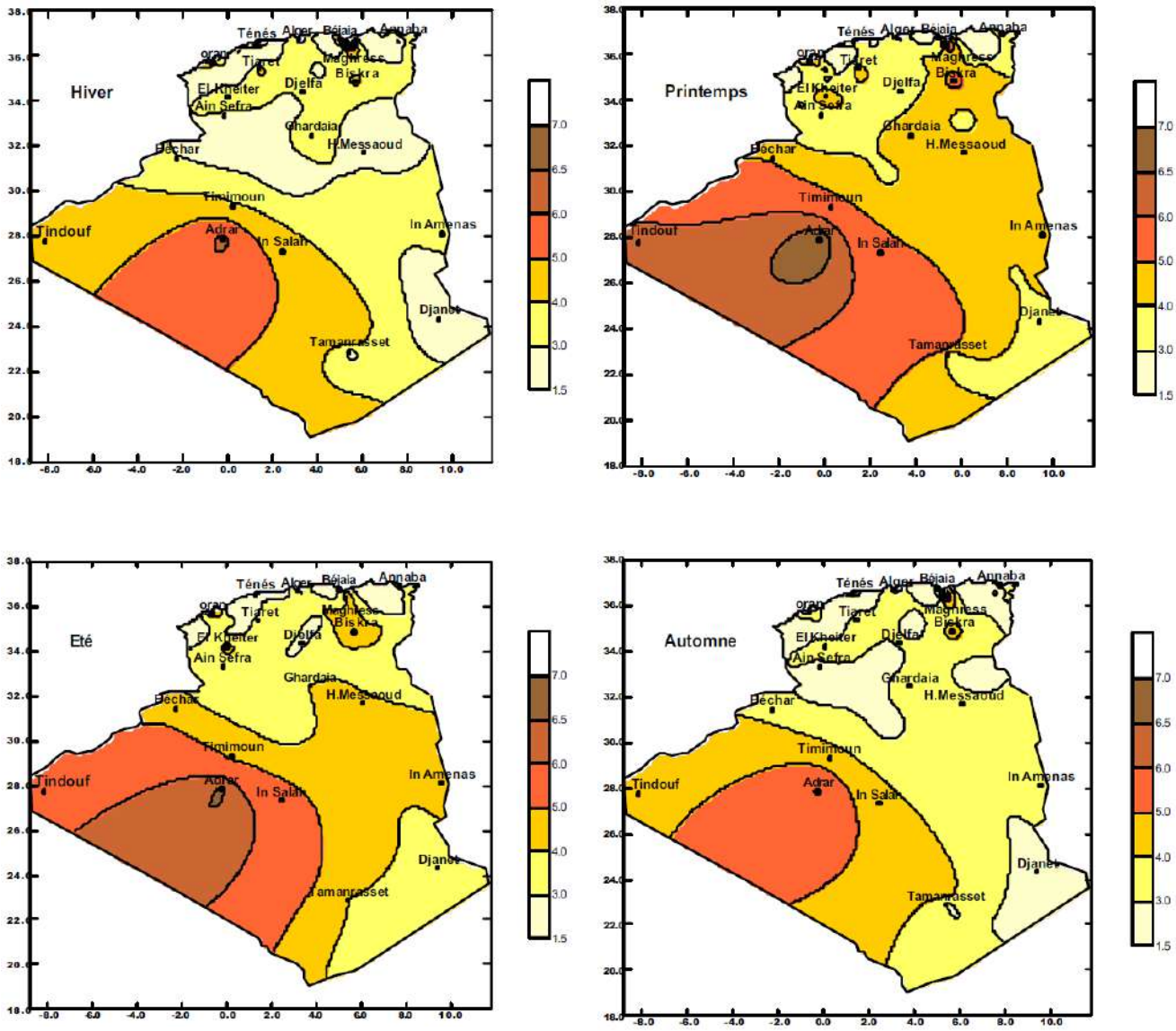


Fig II.**3 :** Cartes Saisonnières de la vitesse du vent (m/s) [4].

Il est important de dire que les données de vent utilisées proviennent de l'Office National de la Météorologie (ONM). Elles sont constituées de vitesses mensuelles de 75 stations de mesure sur une période allant jusqu'à 11 années. La figure 1 représente de la répartition des stations à travers le territoire national. On remarque une répartition importante au Nord avec un taux de 76%, le reste des stations au nombre de 18 sont réparties au sud du 33eme parallèle nord Il est évident qu'il y a une répartition inégale des données au vu de l'espace qui reste très mal couvert dans le grand sud algérien. Un programme a été développé pour le traitement des données de vitesses mensuelles par

années disponibles pour les 75 stations considérées. Celui-ci a permis le calcul de la vitesse moyenne mensuelle par station pour les douze mois de l'année.

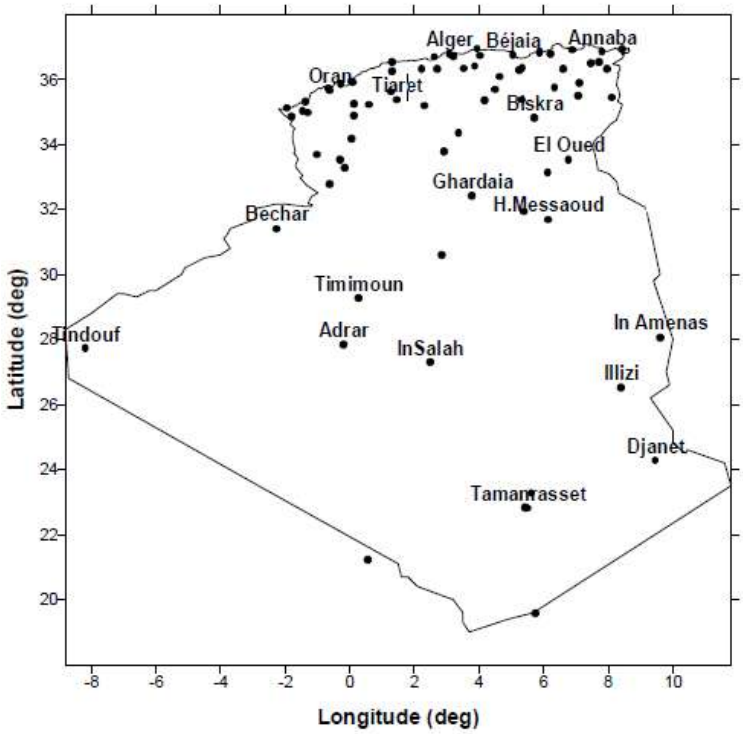


Fig II.4**:** Répartition géographique des stations météorologiques considérées.

La lecture de la figure 3 montre que la vitesse du vent augmente en fonction de la hauteur, l'énergie du vent est généralement captée à des hauteurs supérieures à la hauteur de mesure de 10 m. Les puissances produites obtenues sont représentées en figure 4 pour plusieurs hauteurs.

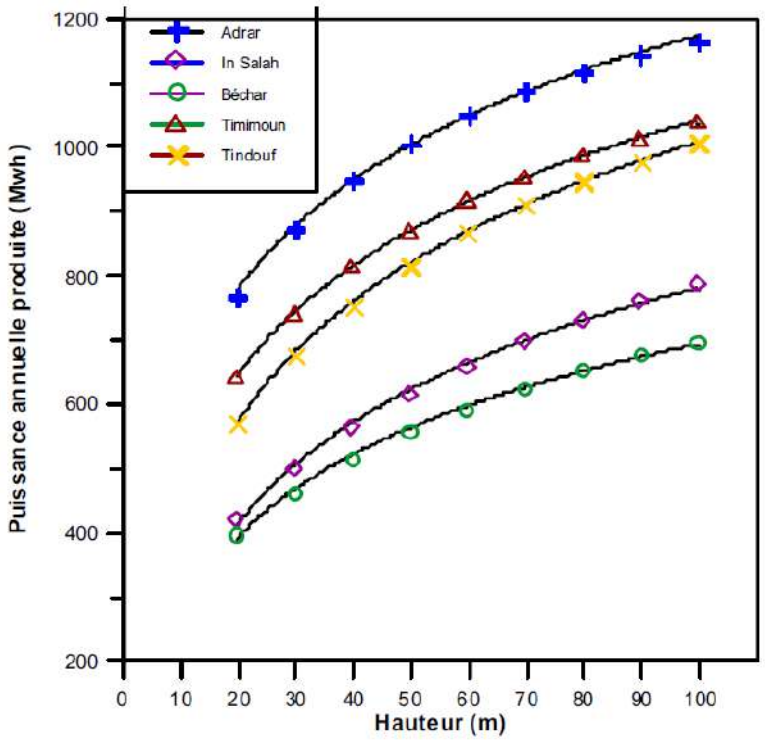


Fig II.5 **:** Variation de la puissance en fonction de la hauteur

Il a été remarqué que la puissance augmente en fonction de la vitesse et de la hauteur. En effet, pour le site d'Adrar par exemple, on remarque qu'une augmentation de la vitesse moyenne d'un taux de 14 % entre 10 m et 50 m a entraîné une augmentation de 60% de la puissance produite. Concrètement, en se basant sur une consommation journalière de 2 kilowatts heure par maison, le nombre de maisons pouvant être alimentées par l'aérogénérateur sélectionné, a été calculé. Les résultats obtenus sont donnés au tableau 1.

Hauteur (m)	Adrar	Béchar	In Salah	Timimoun	Tindouf
20	565	394	417	638	569
30	871	460	497	736	673
40	947	512	560	810	751
50	1003	554	611	867	812
60	1048	589	655	913	864
70	1085	621	694	949	907
80	1115	648	727	983	944
90	1141	672	756	1010	976
100	1162	694	783	1035	1004

Tableau II. **1 :** Nombre de maisons pouvant être alimenté par un système de 200kW.

Il est intéressant de noter qu'un aérogénérateur de 200kw peut alimenter 673 foyers sur le site de Tindouf et 871 foyers à Adrar (à la hauteur de 30 m). De là, on voit bien l'importance et l'intérêt de l'évaluation préliminaire des ressources éoliennes avant d'envisager tout exploitation de cette énergie.

II.6. Autres sites étudiés :

Suite à la même Cartographie de la vitesse du vent du sud, une autre étude sur les perspectives d'installation d'éoliennes dans le cadre de pompage dans la même région ‘sud-ouest) faite par N. Kasbadji Merzouk et al [5], a permis aussi de choisir les six localités, à savoir Adrar, Timimoun, In Salah, Béchar, Tindouf et In Amenas. Une étude statistique a permis la détermination de la carte des vents de la région. La vitesse moyenne annuelle varient entre 3.5 et 6.5 m/s. Par ailleurs, la carte des ressources en eau du Sahara septentrional a montré que la région choisie est caractérisé par l'existence d'un affleurement du continental intercalaire avec un toit de réservoir allant de 10 à 100 mètres de profondeur. Ces deux paramètres combinés permettent de déterminer les perspectives d'installation d'éolienne de pompage dans ces régions. En effet, le calcul de la puissance éolien utile sur un site en fonction des limites de la machin éolienne ont permis la détermination des débits journaliers soutirés à l’aide d’une éolienne à pompage mécanique et un aérogénérateur de différentes puissances nominales.

II.7. Donnée météorologique de la wilaya de Tlemcen et d’Adrar :

Une étude faite par *Rachid MAOUEDJ et al* [6] présente une modélisation et simulation d’un système de conversion éolienne sur les sites de Tlemcen et d’Adrar en utilisant les paramètres météorologiques et radio métriques et la détermination des paramètres de Weibull k et C et la puissance récupéré (vitesses moyennes du vent) en fonction de l’altitude et de rugosité du site.

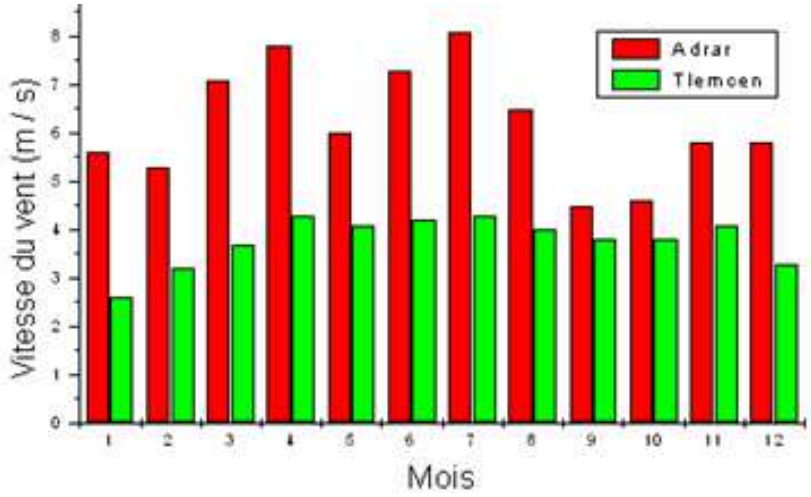


Fig II.**6:** Moyenne mensuelles de la vitesse du vent au site de Tlemcen et d'Adrar.

La figure (6) représente la distribution moyenne mensuelle de la vitesse de vent sur les sites de Tlemcen (la station météorologique de Zénata " Aéroport") et le site d'Adrar à une hauteur de 10 m du sol. On remarque, sur cette figure, que le site de Tlemcen présente une évolution du vent pratiquement uniforme durant l'année (pas de fluctuation et facile a dimensionné). Par contre la région d'Adrar est caractérisée par des variations mensuelles énormes.

Le site de Tlemcen offre un potentiel énergétique éolien assez faible et ne peut être rentable que pour des systèmes de petites puissances. Par contre le site d'Adrar est caractérisé par un potentiel énergétique très important, et peut être rentable même pour les grandes installations.

Le potentiel énergétique récupérable au site d'Adrar est très important (vitesse moyenne annuelle supérieur à 6 m/s) par rapport au site de Tlemcen (vitesse moyenne annuelle 3.8 m/s).

La densité de puissance moyenne annuelle disponible sur le site de Tlemcen à 10 m est estimée à 577,69 kWh/m^2.an et au site d'Adrar pour la même hauteur égal à 2481,83 kWh/m^2.an. La densité de puissance moyenne annuelle récupérable sur le site de Tlemcen à 10m est estimée à 329,05 kWh/m^2.an et au site d'Adrar pour la même hauteur égal à 1464,30 kWh/m^2.an. Cette densité de puissance devient après la correction de la masse volumique de l'air (coefficient de correction thermique, de pression et de l'altitude), 291,82 kWh/m^2.an pour le site de Tlemcen et 1355,90 kWh/m2.an pour le site d'Adrar.

Généralement les vitesses sont mesurées à une hauteur normalisée égale à 10m du sol, mais les aérogénérateurs commercialisés sont installés à des hauteurs supérieures ou égales à 25m du sol, donc les caractéristiques du site doivent être corrigées en utilisant un modèle d'extrapolation verticale. La densité de puissance moyenne annelle récupérable a été estimée à 421,01 kWh/m^2.an à Tlemcen et de 1956,2 kWh/m^2.an à Adrar à 25m de hauteur.

Une récente étude faite par F. Boukli Hacène et al [7] a montrée qu'il y a trois stations près de chelef à considérer comme de vrais sites éoliens, à savoir: Ténès, Miliana et Chlef (Figure II.7). Ces trois sites diffèrent par leurs climat respectif: méditerranéen, montagneux et particulier à cause de l'emplacement de la station de Chlef dans une cuvette. Il faut dire que l'étude s'est orientée vers les stations qui disposent de mesures ininterrompues de données tri horaires pour les vitesses et les directions du vent (Tableau II.2).

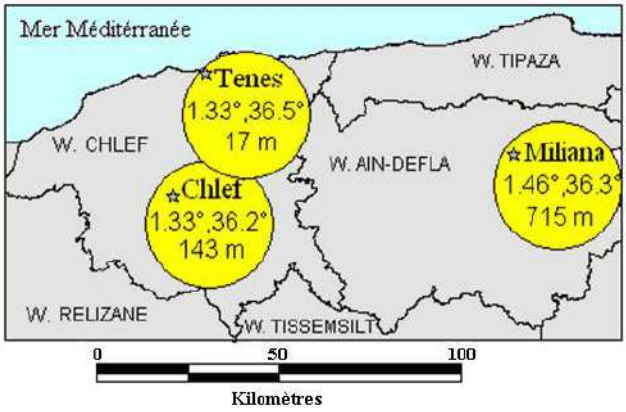


Fig. II.7**:** Coordonnées géographiques des stations étudiées

Site	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Altitude (m)	Période de mesure (an)	Hauteur du mât (m)
Ténès	1.33	36.5	17	5	10
Miliana	2.14	36.18	715	5	10
Chlef	1.20	36.12	143	5	12

Tableau II. **2**: Stations météorologiques au sol implantées dans la région d'étude

La figure 41 représente une carte des vents de la vallée de Chelef toujours estimée à 10 m du sol. Une gamme de variation de la vitesse moyenne annuelle allant de 1 m/s à 6 m/s. La zone côtière de Ténès de la région étudiée est caractérisée par des vitesses moyennes du vent supérieur à 5 m/s. il a été constaté que les communes limitrophes de Ténès, telles que Abou El Hassen, Bouzeghaia et Sidi Abderrahmane ont une vitesse moyenne proche de 5 m/s. On peut dire que la zone la plus ventée de la vallée est la région de Ténès avec les communes voisines.

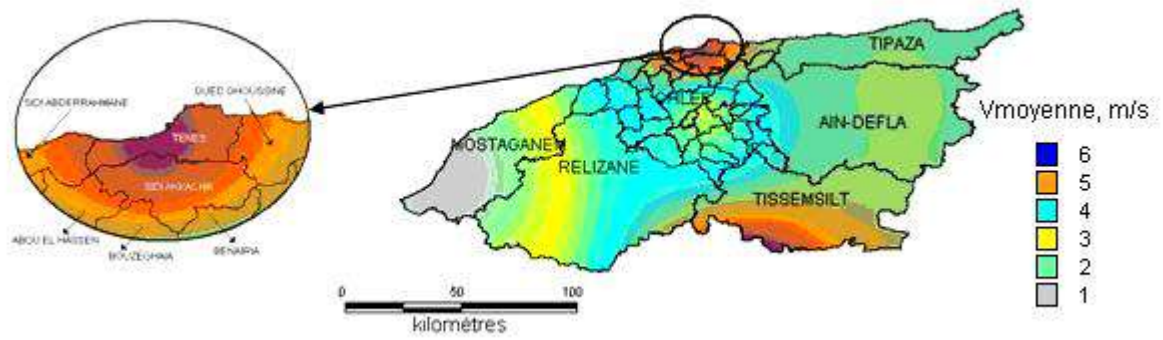


Fig II**. 8:** Atlas de la vitesse moyenne du vent de la vallée de Chlef estimée à 10 m du sol

On constate aussi d'après la figure 9 que la densité de puissance éolienne varie entre 28,2 W/m^2 à la station de Chlef et 128,85 W/m^2 dans la zone de Ténès, quant à celle de la station de Miliana, la valeur moyenne est de 72,369 W/m^2. En d'autres termes, la région de Ténès reste l'endroit le plus énergétique de la vallée et peut être considéré comme un site éolien.

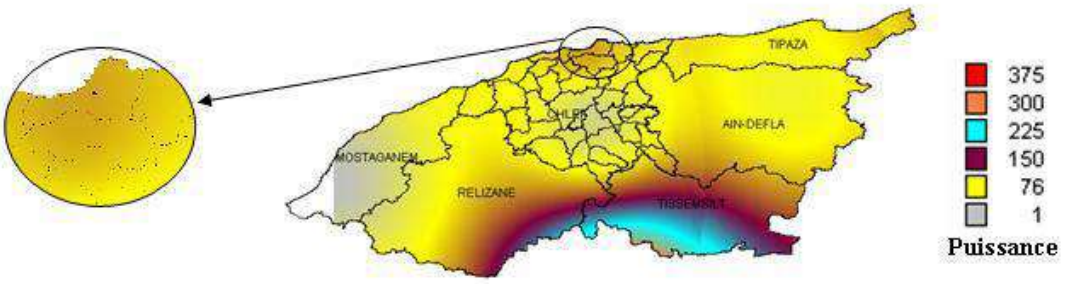


Fig II.9**:** Atlas de la densité de puissance du vont de la vallée de Cheliff estimée à 10 m du sol

Chapitre III :

CONCEPTION MECANIQUE DE LA POMPE

III.1.Introduction :

Cet ensemble puissant d'outils de simulation est entièrement intégré à l'environnement SolidWorks, permettant ainsi une utilisation cohérente par les concepteurs et experts en simulation à chaque étape du développement d'un produit. Grâce aux puissants outils de visualisation des résultats, vous pouvez étudier les forces qui s'exercent sur vos conceptions, en affichant les contraintes, les déplacements, la vitesse des fluides, la pression et la température. Vous pouvez calculer les valeurs pour chaque point, surface ou volume, puis tracer une courbe et dresser la liste des résultats pour tous les types de simulation.

SolidWorks Simulation fournit une gamme complète d'outils d'analyse structurelle multi physiques, d'analyse des mouvements de vos pièces et assemblages ou d'exploration de la dynamique des fluides et les transferts de chaleur autour et à l'intérieur de votre conception .Faisant partie intégrante de la suite SolidWorks de solutions de développement de produits(conception, simulation, conception éco-responsable, communication technique et gestion des données), SolidWorks Simulation est à la fois intuitif et suffisamment puissant pour résoudre les problèmes d'ingénierie les plus complexes. Vous pouvez anticiper les performances de votre conception dans des conditions d'utilisation réelles et ainsi innover, détecter les problèmes potentiels et les corriger avant de passer au prototypage, à l'usinage.

III.2 Schéma cinématique et organes constitutifs :

La figure ci-dessous est une représentation du schéma cinématique d'une Pompe éolienne a axe horizontal.

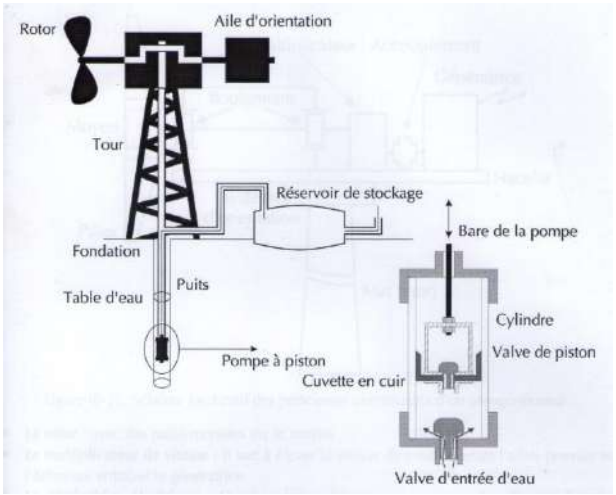


Figure III.1. schéma cinématique dune éolienne a axe horizontal.

III.3 Calcul dynamique :

Le calcule que nous allons entreprendre permettra d'avoir les dimensions approximatives que nous utiliserons pour notre conception .les simulations par le logiciel apporterons les corrections et permettrons une optimisation quand c'est nécessaire.

III.3.1 Les pales :

La géométrie de la pale obtenue par le calcul aérodynamique est assez complexe et un calcul analytique s'avère difficile.

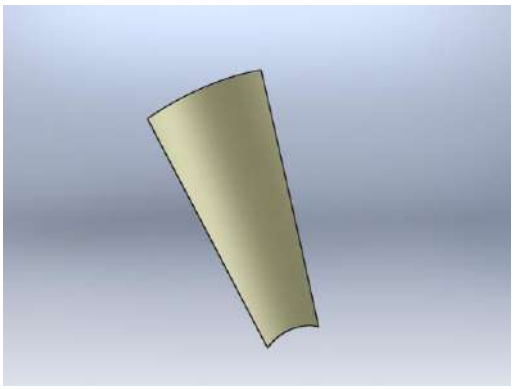


Figure III.2**:** vue 3D de la pale .

Nous adopterons une approche simplificatrice dont nous vérifierons les résultats en simulation par solidWorks .

Nous considérerons que la pale est en forme de cône et d'épaisseur variable dépendant des contraintes au niveau de chaque section. Les charges appliquées sur la pale sont les forces aérodynamiques et la force gyroscopique.

Nous pouvons alors calculer la contrainte de flexion et la contrainte normale appliquée a chaque section . ‹‹i›› caractérisée par :

- d_i diamètre du cercle égal a la corde de la station i ;
- e_i épaisseur de l'anneau ;
- D_i diamètre de la section ‹‹i›› ;
- Δr espacement entre section ;

- La condition de résistance d une section au chargement est :

$$\sigma_x < \frac{\sigma_e}{c_s} \qquad (1)$$

- σe: limite élastique en extension du matériau, C_s : coefficient de sécurité

$$\sigma_x = \sigma_f + \sigma_n = \frac{M_f d}{2I} + \frac{F_c}{A} \qquad (2)$$

M_f= moment de flexion Fc = force centrifuge, I = moment quadratique de la section

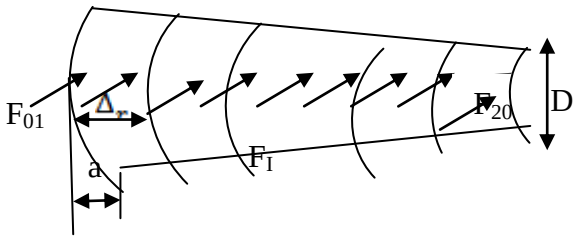


Figure III.3 modélisation du chargement sur la pale.

F_i sont les résultantes des forces tangentielles et axiales pour chaque section ‹‹i››

$$F_i = \sqrt{F_{t2}^2 + F_{ai}^2} \qquad (3)$$

$$\Delta r = \frac{(R - rm - a)}{20} \qquad (4)$$

r_m=rayon du moyeu

a=longueur du support de la pale ,

- **<u>Calcul du moment fléchissant</u> :**

Pour une section donnée ‹‹i›› :

$$x \in [i\Delta r\ ,(i+1)\Delta r[\quad M_{fi} = (\sum_{k=1}^{i=1}(i-k)F_K)\Delta r \qquad (5)$$

sachant que pour une station i

$$I_i = \frac{\pi}{64} = (d_i^4 - (di - 2e_i)^4) \qquad (6)$$

$$A_i = \frac{\pi(d_i^2 - (d_i - 2e_i)^2)}{4} \qquad (7)$$

L'expression de la contrainte de flexion s'exprime par

$$\sigma_f = \frac{\sum_{k=1}^{i=1}(i-k)F_K)\Delta r(di - 2e_2)}{\frac{\pi}{32}(di^4 - (di - 2e_i)^4)} \qquad (8)$$

La condition de résistance s'écrit alors

$$\sigma_X = \frac{\sum_{k=1}^{i=1}(i-k)F_K)\Delta r(d_i-2e_i)}{\frac{\pi}{32}(d_i^4-(di-2e_i)^4)} + \frac{Fc}{\frac{\pi}{4}(d_i^2-(di-2e_i)^2)} < \frac{\sigma e}{Cs} \qquad (9)$$

la détermination des valeurs de l'épaisseur [e] se fait par calcul itératif.

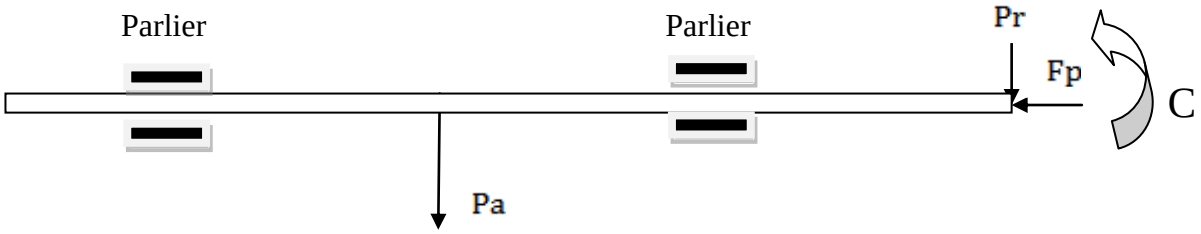
Les données nécessaires au calcul ainsi que les résultats sont détailles en annexe A

<u>Remarque :</u> le diamètre D du pied de la pale doit être vérifié au cisaillement.

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^{20} F_i}{\frac{\pi}{4} D^2} < \frac{\tau\ adm}{Cs} \qquad (10)$$

III.3.2 L'arbre :

L'arbre est soumis aux contraintes de compression (force de poussée du rotor), contrainte de flexion (poids du rotor et poids propre de l'arbre), et une contrainte de torsion du au couple de l'hélice. La figure (III .4) schématise le chargement de l'arbre .



-Calcul de la contrainte normale du a la compression.

$$\sigma_n = \frac{F_p}{S} \qquad (11)$$

F_p = force de poussée du rotor (résultante des forces axiales) A=Section de l'arbre

- Calcul de la contrainte de flexion :

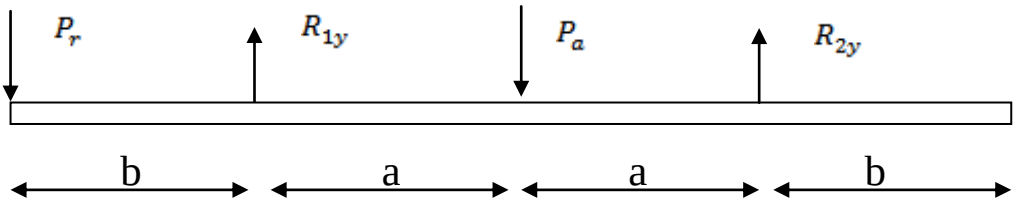


Figure III.5 schématisation du chargement sur l'arbre

$$\sum F = 0 \ , \sum M/0 = 0 \qquad (12)$$

$$\begin{cases} R_{1y} + R_{2y} = P_a + P_r \\ R_{1y}.C + R_{2y}(2a+b) = P(a+b) \end{cases}$$

Avec 2a+2b=L a=2b

La résolution du système d'équation nous donne :

$$\begin{cases} R_{1y} = \frac{P}{2} + \frac{5}{4}P_r \\ R_{2y} = \frac{1}{2}(P - \frac{1}{2}P_r \ ) \end{cases}$$

Les moments de flexion sont

$$\begin{cases} x = 0 & M_f \\ x = c & M_f = -p_r.c \end{cases} = 0$$

$$\begin{cases} x = c + a \\ x = c + 2a \end{cases} \qquad \begin{matrix} Mf = \left(P - \frac{p_r}{2}\right)c \\ Mf = 0 \end{matrix}$$

Le diagramme des moments fléchissant indique que section dangereuse se situe au niveau du palier . De ce fait la condition de résistance diapres le critère de Tresca s'écrit:

$$\left(\frac{4F_p}{\pi d^2} + \frac{32M_f}{\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{32c}{\pi d^3}\right)^2 < \left(\frac{\sigma_e}{Cs}\right)^2 \qquad (13)$$

Le calcul du diamètre se fera par un calcul itératif.

III.3.3 Montage pales –moyeu:

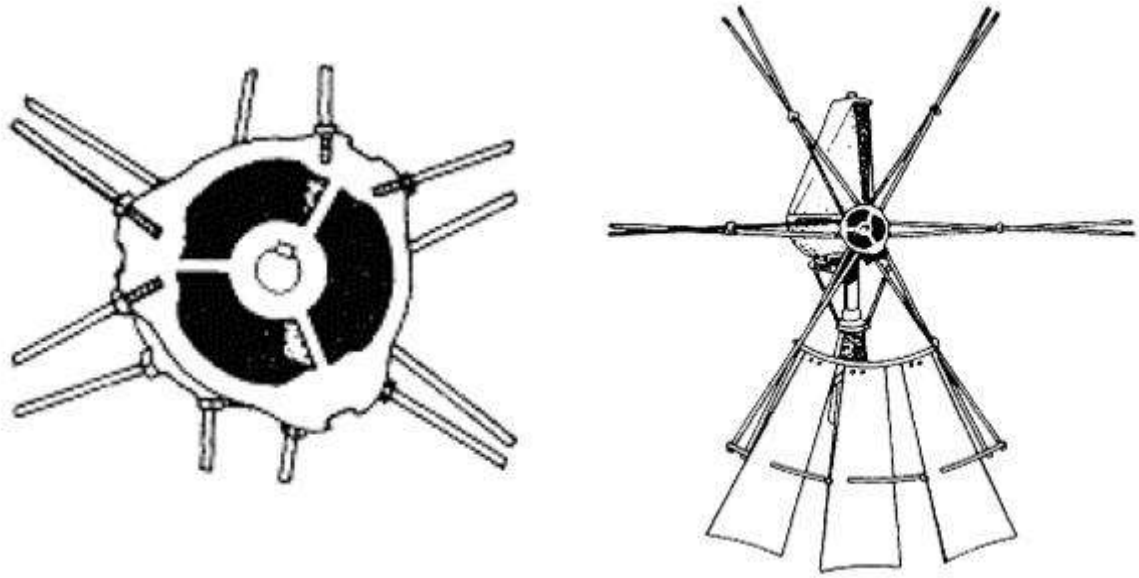


Figure III.6 montage moyeu - pales

Comme l'indique la figure, chaque pale est reliée au moyeu par le biais de deux boulons .Nous indiquerons dans ce qui suit la procédure a adopter pour ce calcul.

III.3.3.1 Calculs du diamètre de la tige:

les deux tiges sont soumises en cisaillement du deux forces F_a ,P_p , F_c

F_a= force axiale du a l'écoulement autour de la pale.

F_c=force centrifuge

P_p= poids de la pale

Toutes ces forces se trouvent sur un même plan. On en déduit la résultante

$$F = \sqrt{(p_p + F_c)^2 + F_a^2} \qquad (14)$$

Comme nous avons deus boulons, chaque tige doit alors supporter la moitie de la force F.

La comme nous avons deux boulons, chaque tige doit alors supporter la moitie de la force F.

La contrainte de cisaillement est donnée par la formule suivante

$$\tau = \frac{F}{4S_t} \qquad S_t = \frac{\pi d}{4} \text{=section de la tige} \qquad (15)$$

Pour que la tige résiste au cisaillement soit inferieur a la contrainte pratique du matériau moyennant un coefficient de sécurité. Le diamètre est alors déduit de l'équation ci-dessous.

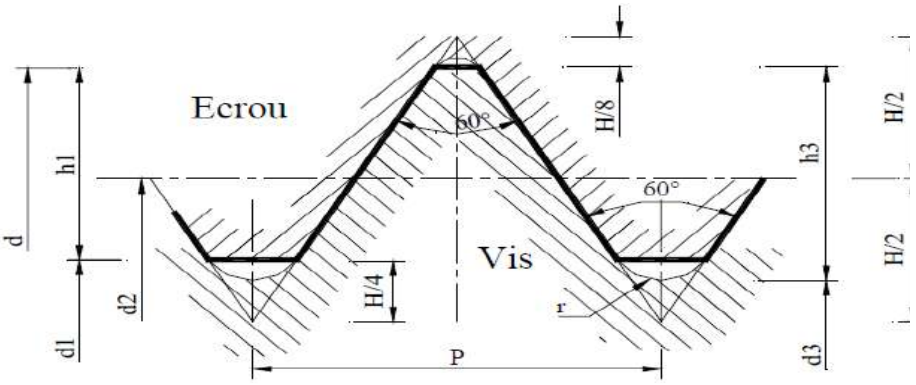
$$d \geq \sqrt{\frac{4csF}{\mu\sigma_{eg}}} \qquad (16)$$

σ_{eg} Limite élastique en cisaillement (glissement).

Le diamètre étant détermine nous pouvons choisir dans les tables normalise le boulons que nous allons utiliser et connaitre toutes ces dimensions.

III.3.3.2 calcul du couple de serrage :

Dans les assemblages boulonnes on évite de contraindre les boulons en cisaillement pour cela nous allons calculer le couple de serrage permettant une adhérence suffisante entre les surfaces en contacte qui soit supérieur a la force provocant la contrainte de cisaillement a savoir la force F.



P: Pas
d: diamètre nomina
d1= d-1,0825 P
d2= d-0,6495 P
d3= d-1,2268 P
r= 0,1443 P

Le couple de serrage est donné par la formule suivant :

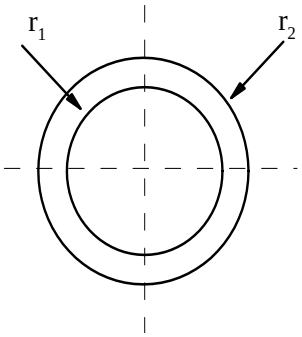
$$c = Q\left[fr_{moy} + (f' + \tan\alpha) r'_{moy} \right] \qquad (16)$$

f : coefficient de frottement entre l'écrou et la pièce

f' : coefficient de frottement entre les filets (vis /écrou)

r_{moy} : rayon moyen de la surface plane de l'écrou

r'_{moy} : rayon de l'hélice moyenne



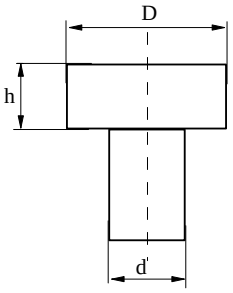
$$r_{moy} = \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} \; ; \; r'_{moy} = \text{d/2-H(H :hauteur du pas)}$$

L'adhérence entre les surface est assuré par la force Q

Sachant que μ est le coefficient de frottement entre les

Pièce en contacte, la force d'adhérence s'exprime par :

$$F_{ad} = \mu Q \rangle F$$



III.3.4 résistances à la traction, cisaillement et matage :

-traction au niveau de la tige :

$$\sigma_n = \frac{Q}{S_t} < \frac{\sigma_e}{CS} \qquad (17)$$

-cisaillement de la tête du boulon

Contrainte de cisaillement :

$$\sigma = \frac{Q}{S} < \frac{\sigma_{eg}}{CS} \qquad S = \pi dh \qquad (18)$$

σ_{eg} : Résistance élastique au cisaillement

$$h \geq \frac{Q.CS}{\pi d \sigma_{eg}} \qquad (19)$$

C'est la valeur la plus grande de h qui est prise en considération

- Matage des filets

La vérification de la résistance au matage permet de déduire le nombre de filet nécessaire

$$p_c = \frac{Q}{S_p} < p_{adm} \qquad (20)$$

p_c : Pression de contacte ;

S_f : Surface totale de filet en prise ;

$$S_p = n\pi \frac{d^2 - d_2^2}{4} \qquad (21)$$

n : nombre de filet

p_{adm}: Pression admissible ;

- Cisaillement des filets

$$\tau_n = \frac{Q}{S_c} < \frac{\sigma_{eg}}{CS} \qquad (22)$$

S_c : Surface cisaillée $S_c = n\pi d_2$ (P : pas de filetage)

Le nombre des filets boulons est :N ≥ n+a ; (écrou : a= 2 vis :a=4)

La longueur filetée de la tige est : L = N.P

III.3.5montage moyeu-arbre:

III.3.5.1 montages par clavette:

Le calcule de clavette consiste à déterminer la longueur nécessaire permettant de supporter la pression du au force de contactes. Les dimensions des sections transversales des clavettes sont normalisées du diamètre de l'arbre.

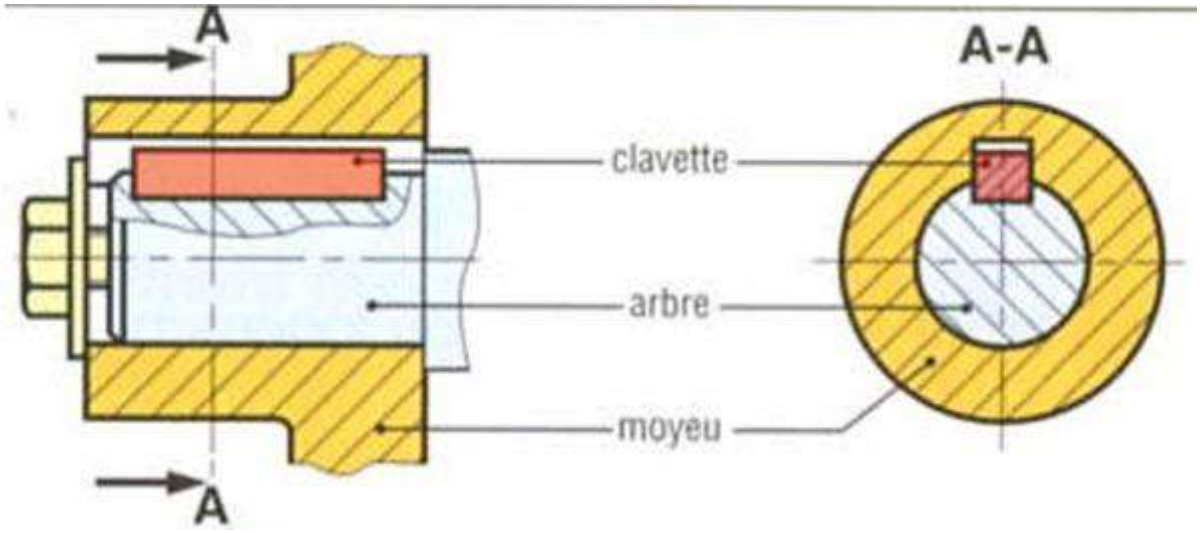


Figure III.7 montage par clavette

La résultat des force des contacte peut être déterminé du couple moteur et rayon de l'arbre.

$$T = \frac{C_M : Couple \quad moteur}{R : rayoon \quad de \quad l'arbre} \tag{23}$$

Nous pouvons alors calculer la pression de contacte P de la formule :

$$p = \frac{T}{S} = \frac{T}{l * e} \tag{24}$$

Avec e : épaisseur du flanc de la clavette e≈b/2

Sachant que la pression de contacte doit être inferieure a la pression admissible (p_{adm})du matériau nous pouvons déduire la longueur de la clavette :

$$l \geq \frac{C}{R * e * p_{adm}} \tag{25}$$

III.3.6 La tour :

Dans les constructions d'éolienne , la hauteur du mat qui supporte la nacelle est équivalente à1-1,5 le diamètre . pour notre conception nous avons approximer la hauteur à10 m . pour faciliter la réalisation et l'installation la tour sera former de deux partie de hauteur H1 et H2 el que :

$$H_1 = \frac{4}{5} H_2 et H_1 + H_2 = 10m$$

La tour est soumise au poids p_n de la nacelle, la force de poussé F_p du rotor et à la force du vent . la figure ci-dessous modélise le chargement de la tour .

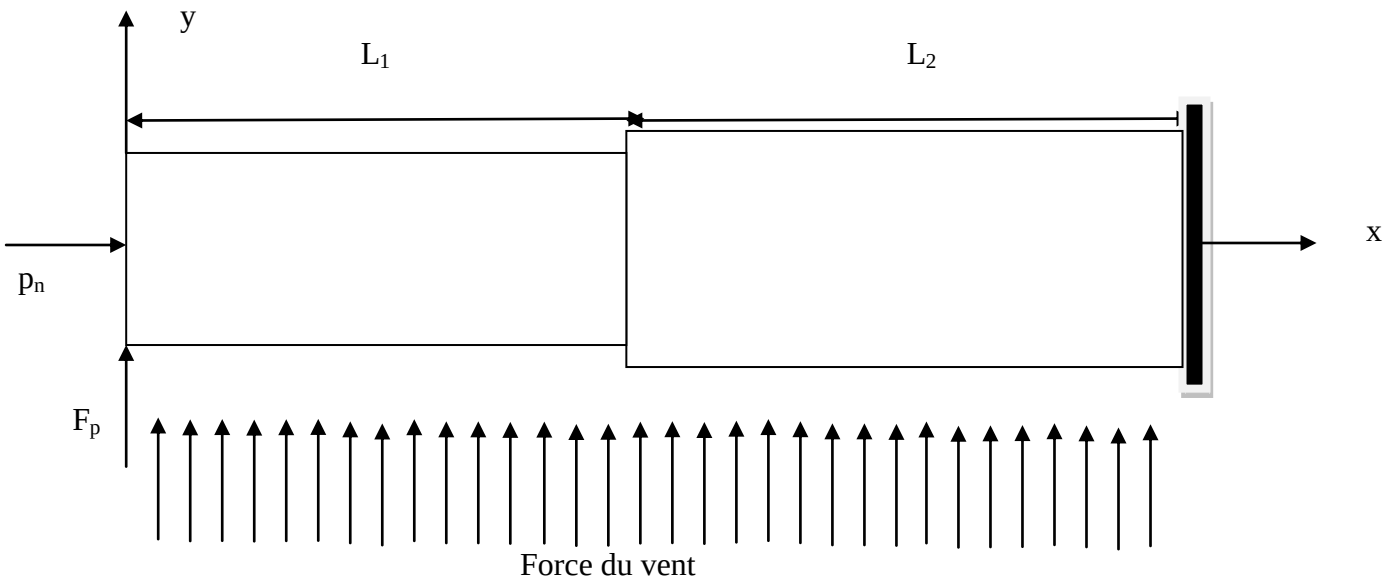


Figure III.8 schématisation du chargement de la tour

III3.6.1 résistances à la flexion-compression :

- contrainte normal

$$\begin{cases} \sigma_{n1} = \dfrac{P_n}{S_1} = \dfrac{P}{\dfrac{\pi}{4}(D_1^2 - D_i^2)} \; partie \;\; \text{sup}\, erier \;\; L_1 \\ \sigma_{n1} = \dfrac{P_n + \rho_1 g S_1 L_1}{S_2} = \dfrac{P_n + \rho_1 g S_1 L_1}{\dfrac{\pi}{4}(D_2^2 - D_i^2)} \; parie \;\; \text{inf}\; erieur \;\; L_2 \end{cases} \qquad (26)$$

ρ_1 : masse volumique du matériau de la tour

D_i : Diamètre de passage du câblage électrique

- Contrainte de flexion

Le vent applique une pression $P_v = V^2/2$ sur la tour (27)

ρ : masse volumique de l'air

La contrainte de flexion s'exprime par :

Partie supérieur L_1

$$\sigma_{f1} = \frac{32L_1(F_p + \frac{\rho\pi V^2 L_1 D_1}{4})}{\pi D_1^3} \quad (28)$$

Partie inferieur L_2

$$\sigma_{f2} = \frac{32L_2(\frac{9}{5}F_p + \frac{7}{20}\frac{\rho\pi V^2 L_1 D_1}{4} + \frac{\rho\pi V^2 L_2 D_2}{4})}{\pi D_2^3} \quad (29)$$

Un calcul numérique nous permettre de déterminer les D_1 et D_2

III3.6.2 vérifications au flambement :

Le problème de calcul des tubes en acier est très complexe . dans la pratique ,il peut , sauf rares exceptions, être ramené à quelques cas simples .

1956 suffisent ordinairement. Nous transposons ici les données de ce règlement pour leur application limitée à des tubes isolés comme il est le cas pour notre conception

Le calcul consiste à vérifier que la somme des taux de fatigues en compression simple e en flexion simple amplifiés chacun de son coté par des coefficients $k_n et \quad k_f$ est inferieur à la fatigue admise , elle-même réduite par u coefficient (1- $0.2k_0$) .

La formule de vérification est :

$$K_n\sigma_n + K_f\sigma_f < (1 - 0.2K_0)\sigma \quad (30)$$

- On cherche dans le tableau 1annexe ,B le cas de flexion correspondant à la configuration de chargement et on note les valeurs de 1, A et M_0
- On détermine les valeurs de :

$$\sigma_n = \frac{p}{S}$$
$$\sigma_f = \frac{M_0 R}{l} \quad (31)$$

r : rayon de giration γ : élancement

CS étant le coefficient de sécurité on détermine la quantité :

$$\mu = \frac{n_c}{CS \times \sigma_n} \qquad (32)$$

III.4 Calculs d'engrenage :

III.4.1 Schéma cinématique d'engrenage :

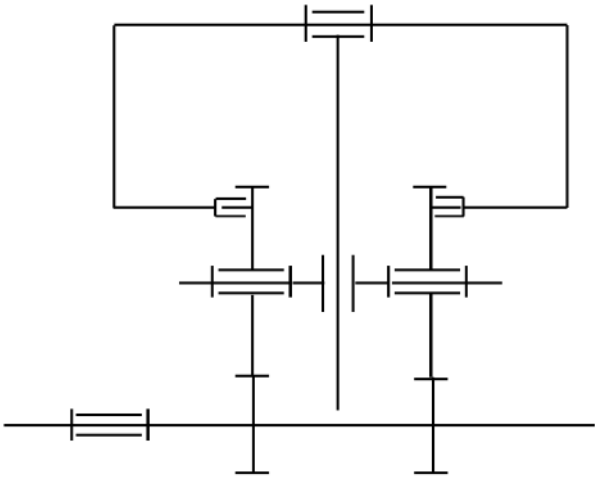


Figure III.9 : schéma cinématique d'engrenage

III.4.2 Extraction du module M , Nombre des dents Z , les n 2 diamètres primitifs d_1 et d_2

On à :

- Rapport entrée/sortie : $r = \frac{N_2}{N_1} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{d_2}{d_1} = 3.28$

-Facteur $\beta = 20 \quad z_2 = 46 \quad z_1 = 14 \quad d_{a2} = 304.5 \quad d_{a1} = 101.5 \quad h_a = 6.25$

-Module $m = h_a = 6.254 \approx 6.25$

Désignation	**Symbole**	**loi**	**ruisselant**
Module	**m**	**$m=h_a$**	**6.25**
Pas	**p**	$p = m.\pi$	**19.625**
Saillie	**h_a**	**$h_a=m$**	**6.25**
Creux	**h_f**	**$h_f=1.25m$**	**7.8125**
Hauteur de dent	**h**	**$h=h_a+h_f=2.25m$**	**14.0625**
Diamètre de primitif	**d**	**d=m z**	**$d_1=87.5$**

			d_2=287.5
Diamètre de tête	d_a	$d_a=d+2m$	d_{a1}=100 d_{a2}=300
Diamètre de pied	d_f	$d_f=d-2.5m$	d_{f1}=71.875 d_{f2}=271.875
Entraxe calcule	**a**	$a=(d_1+d_2)/2$	**a=187.5**

III.5 vérification des calcules dynamique par solidworks:

L'interface COSMOS Works nous permettra de valider les dimensions des organes principaux pales, tour et d'optimisations ou correction quand c'est nécessaire.

III.5.1 1a tour:

Le calcul analytique nous donne la dimension suivante :

D1=90mm e1=18mm h=4500 mm

D2=110mm e2=22mm h2=5500mm

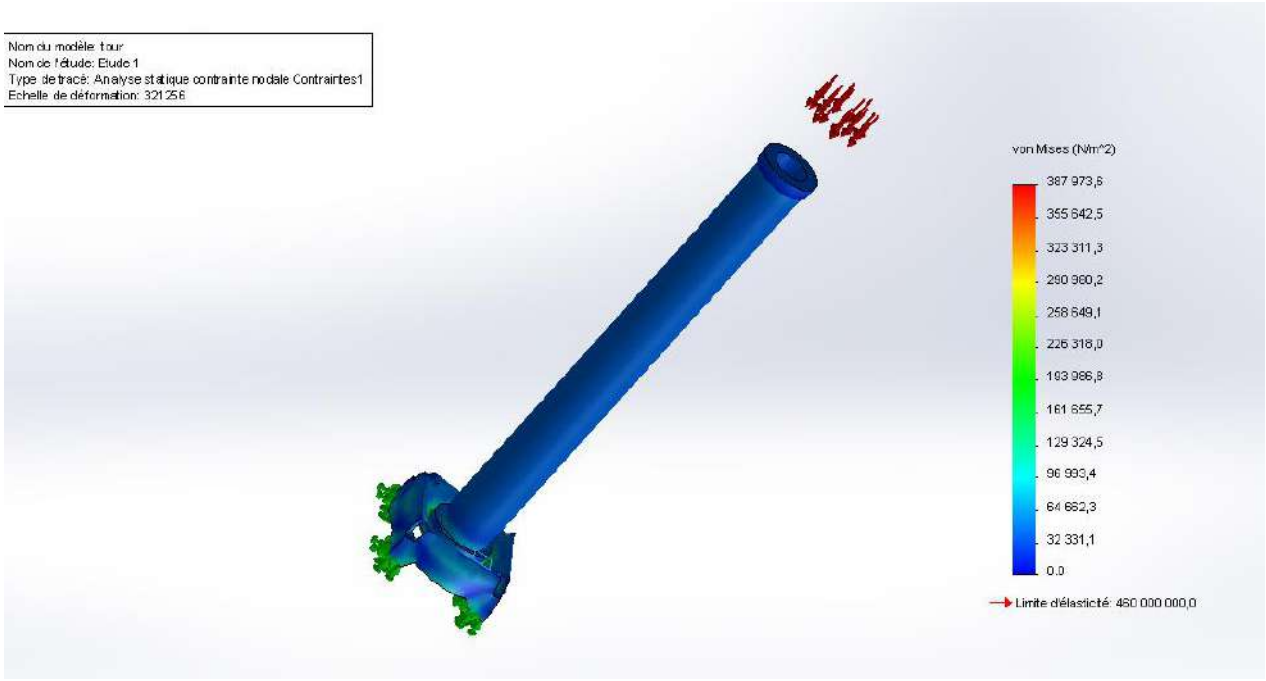


Figure III.10 Distribution des contraintes

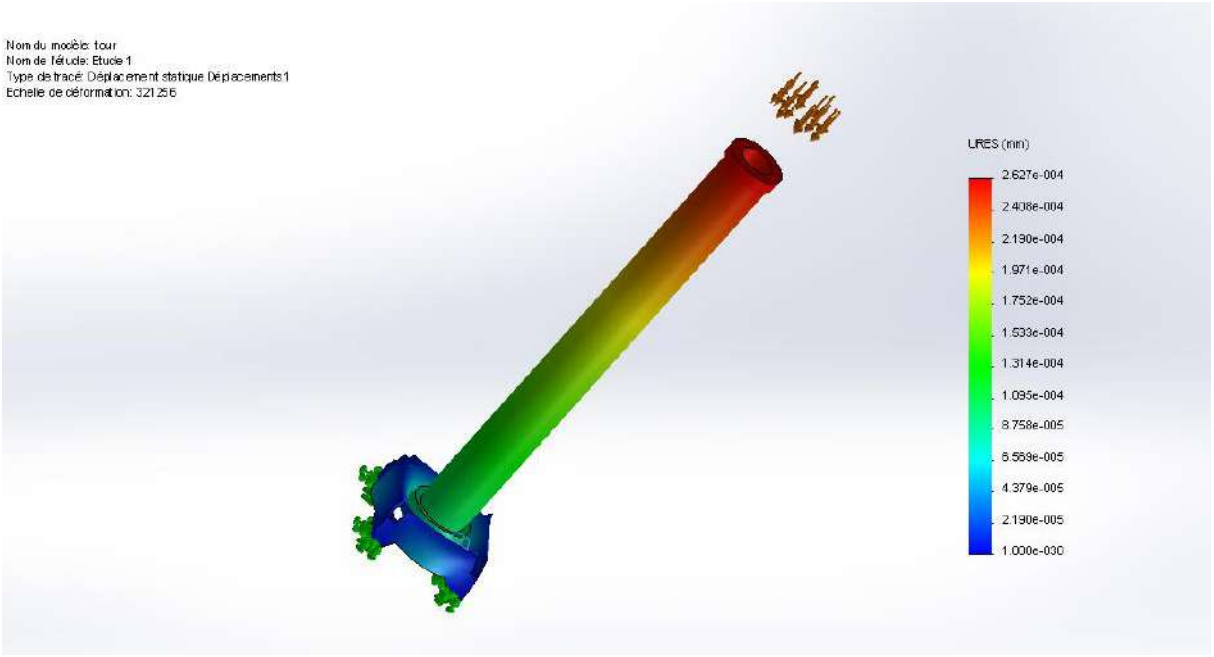


Figure III.11 Distribution des déplacements

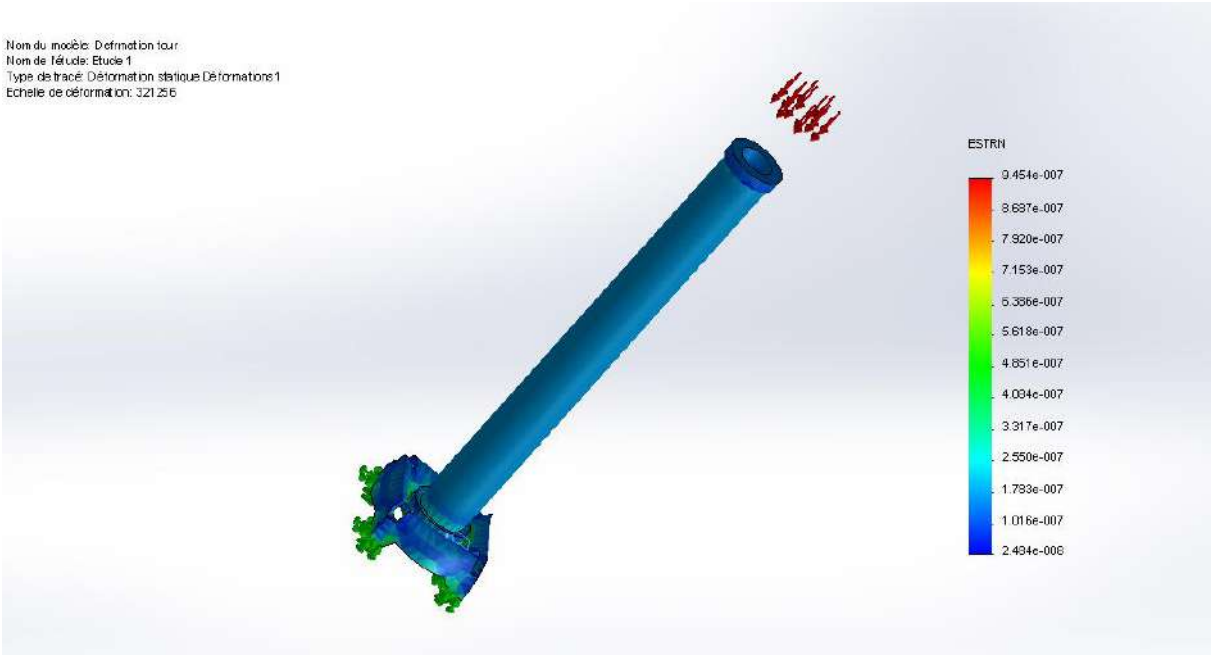


Figure III.12 Distribution des Déformations

En la figures précédentes nous remarquerons la présence de zone colore en orange au niveau inferieur de la tour prés.la contrainte avoisine les 387973 N/m^2ce que dépasse pas la contrainte pratique des matériaux utilise 46*10 ^{7} N/m^2

Pour les déplacements, nous constatons en analysant les résultats de simulations pour une tour figure III.10,que le sommet de la tour se déplace de 2,627*10^{-4} mm.

III.5.2 la pale:

Les démontions des élément de la pale sont obtenues par le calcule aérodynamique .le calcule dynamique permet la détermination de la variation de l'épaisseur en onction du rayon .

La pale contenant 18 éléments de longueur égale nous avons opte pour une simulation élément par élément sachant que la force applique en une section i .

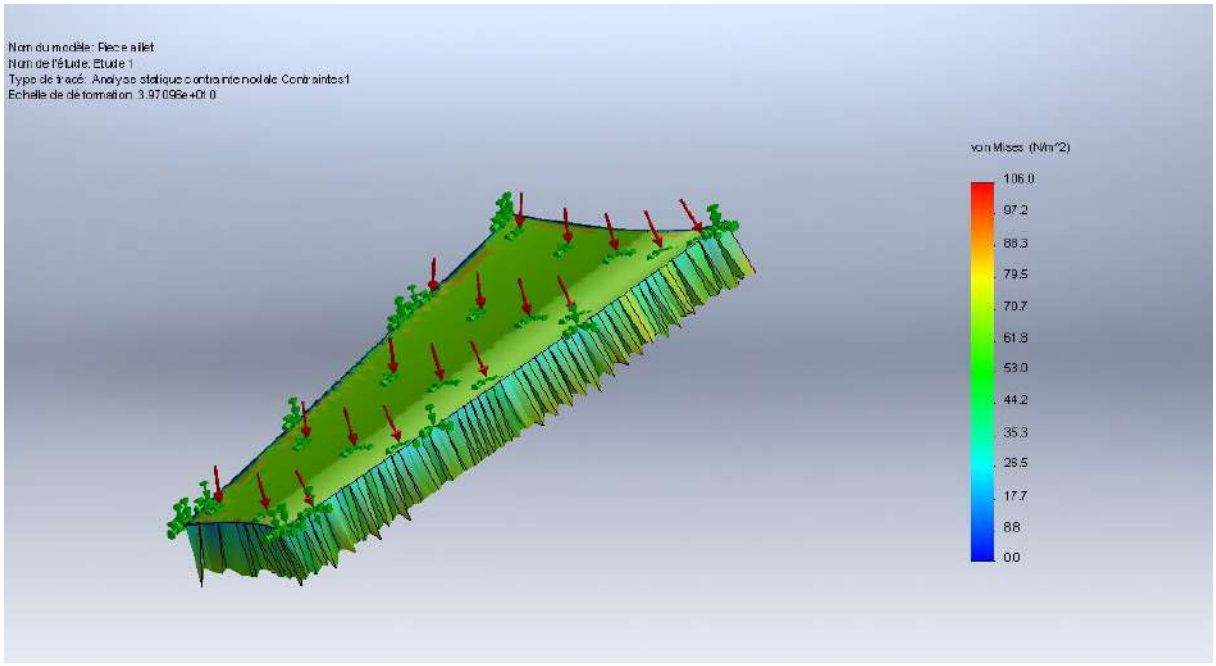


Figure III.13 Distribution des contraintes

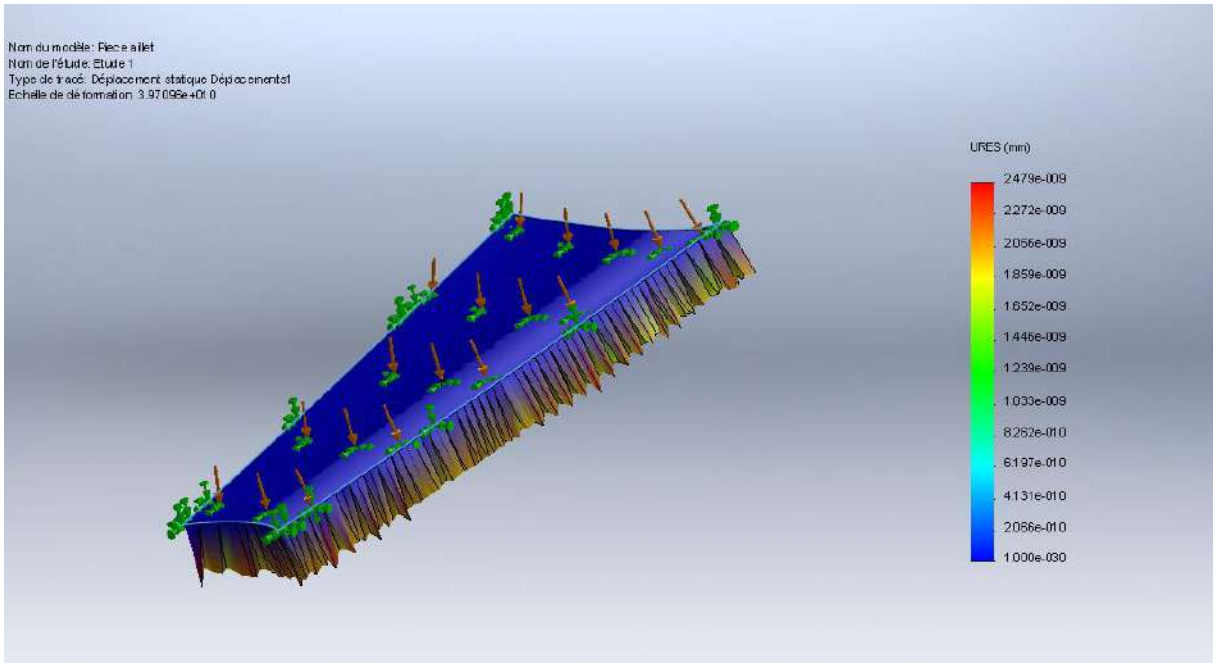


Figure III.14 Distribution des déplacements

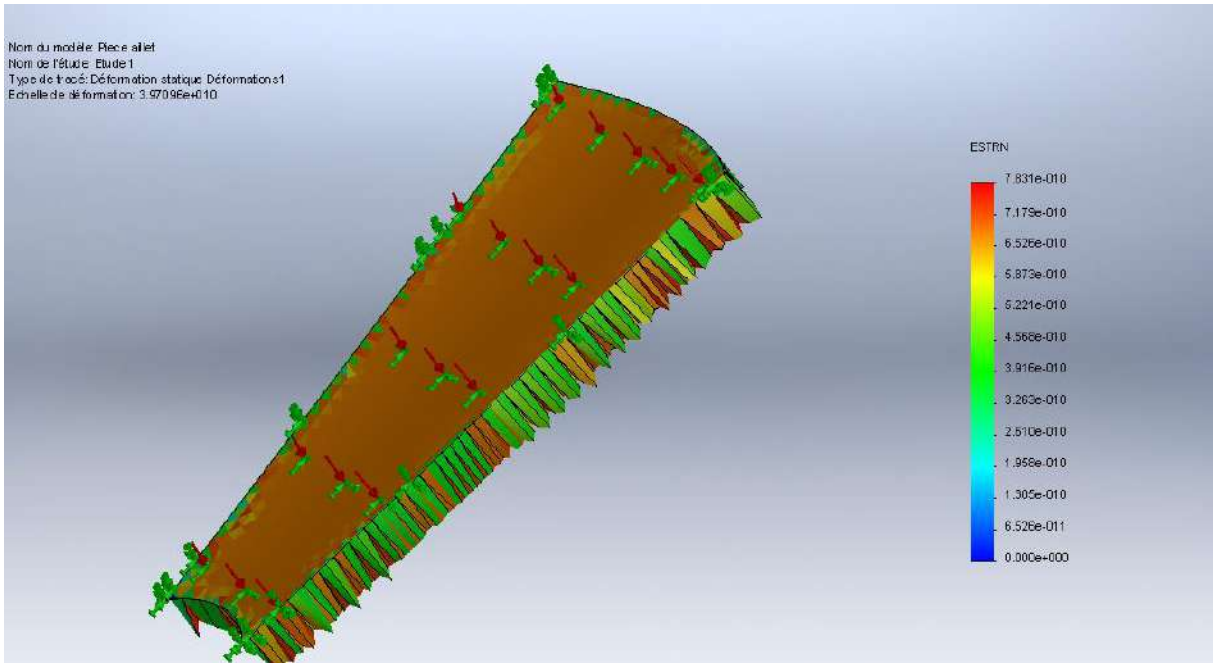
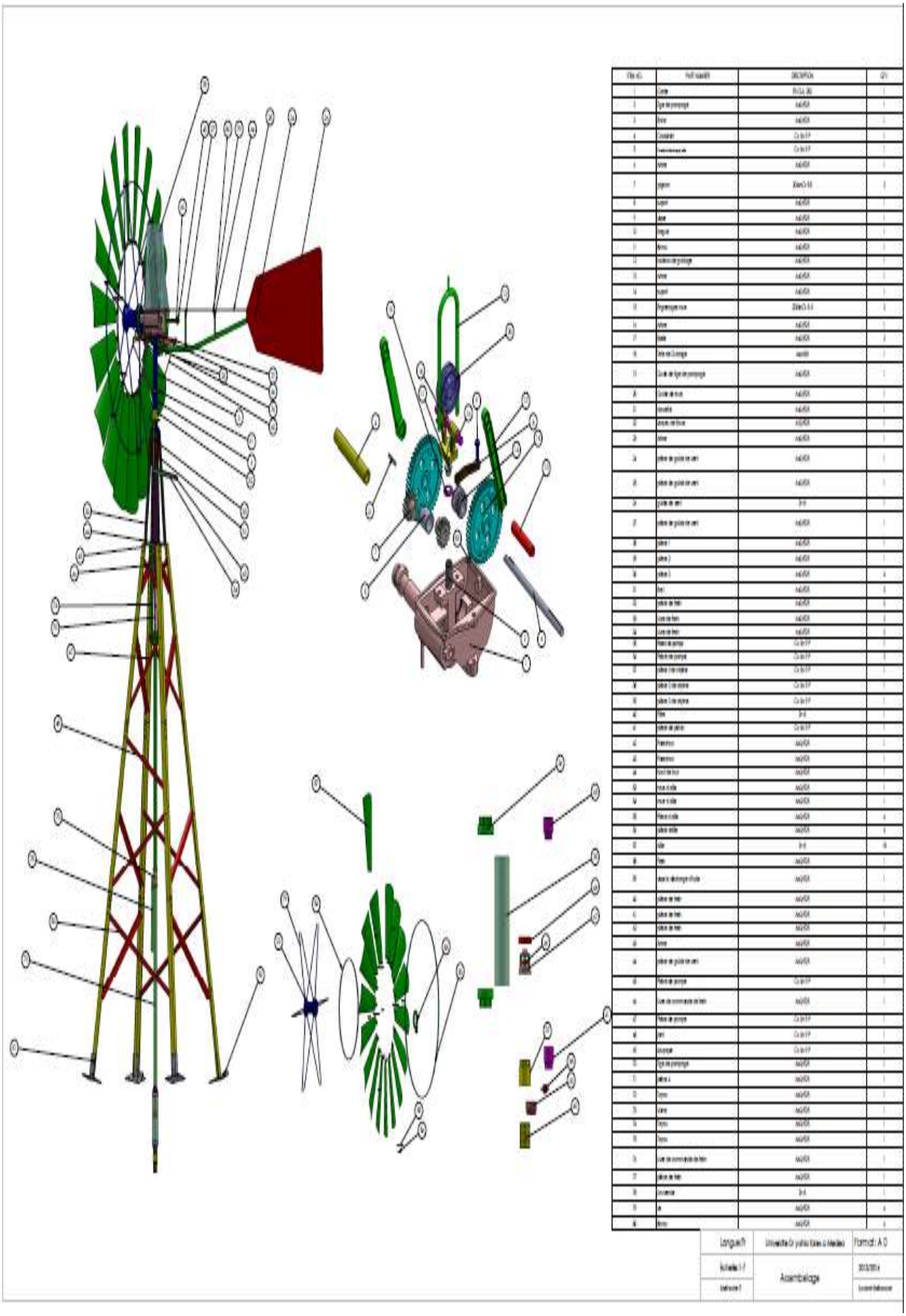


Figure III.15 Distribution des Déformations

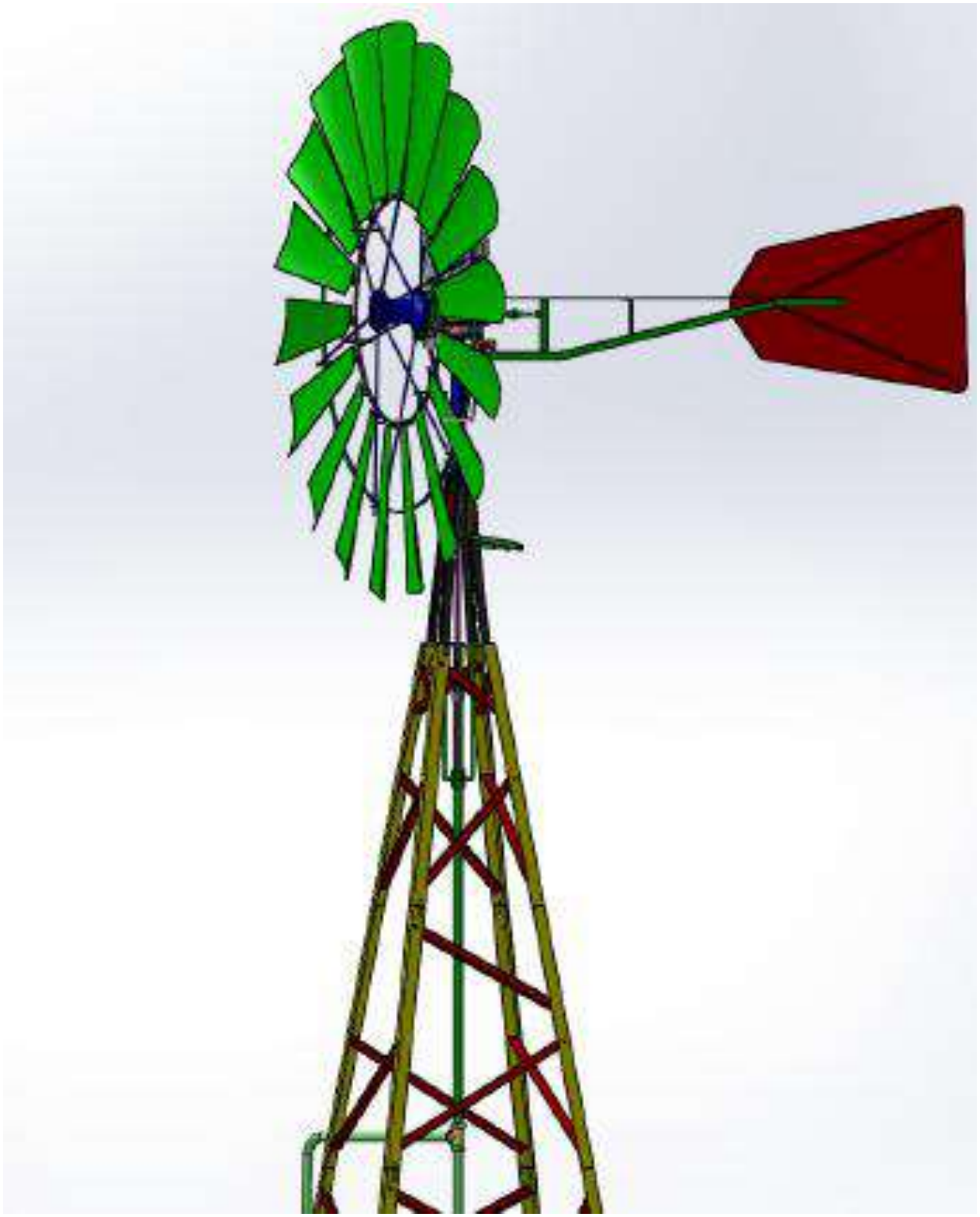
Les résultats des simulations indiquent que la pale n'est pas soumise a des contraintes dépassants a la limite d'élasticité $285*10^{6} N/m^{2}$. Les déplacements relative de chaque éliment par rapport a l'élément adjacent sont insignifiants de l'ordre de $2/10*^{9}$ mm.

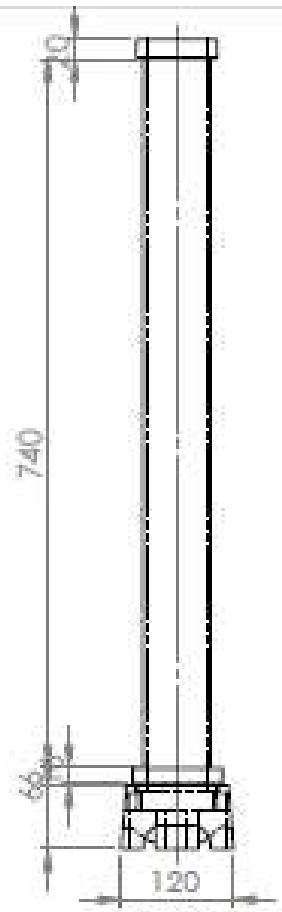
Chapitre IV:

DESSINS TECHNIQUES DES EOLIENNES MULTIPLES

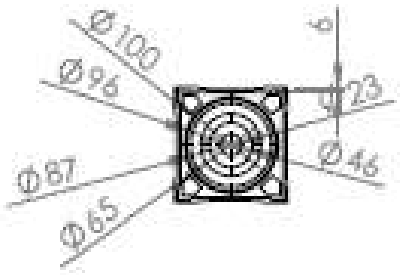


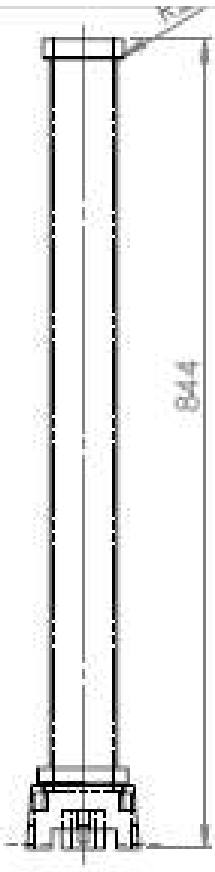
Titre	Format : A 0
Assemblage	

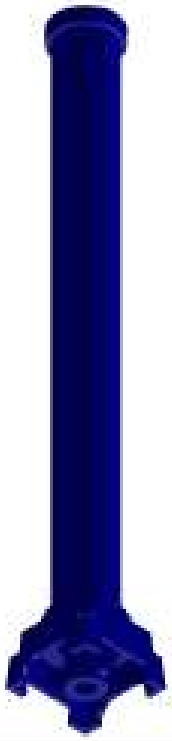




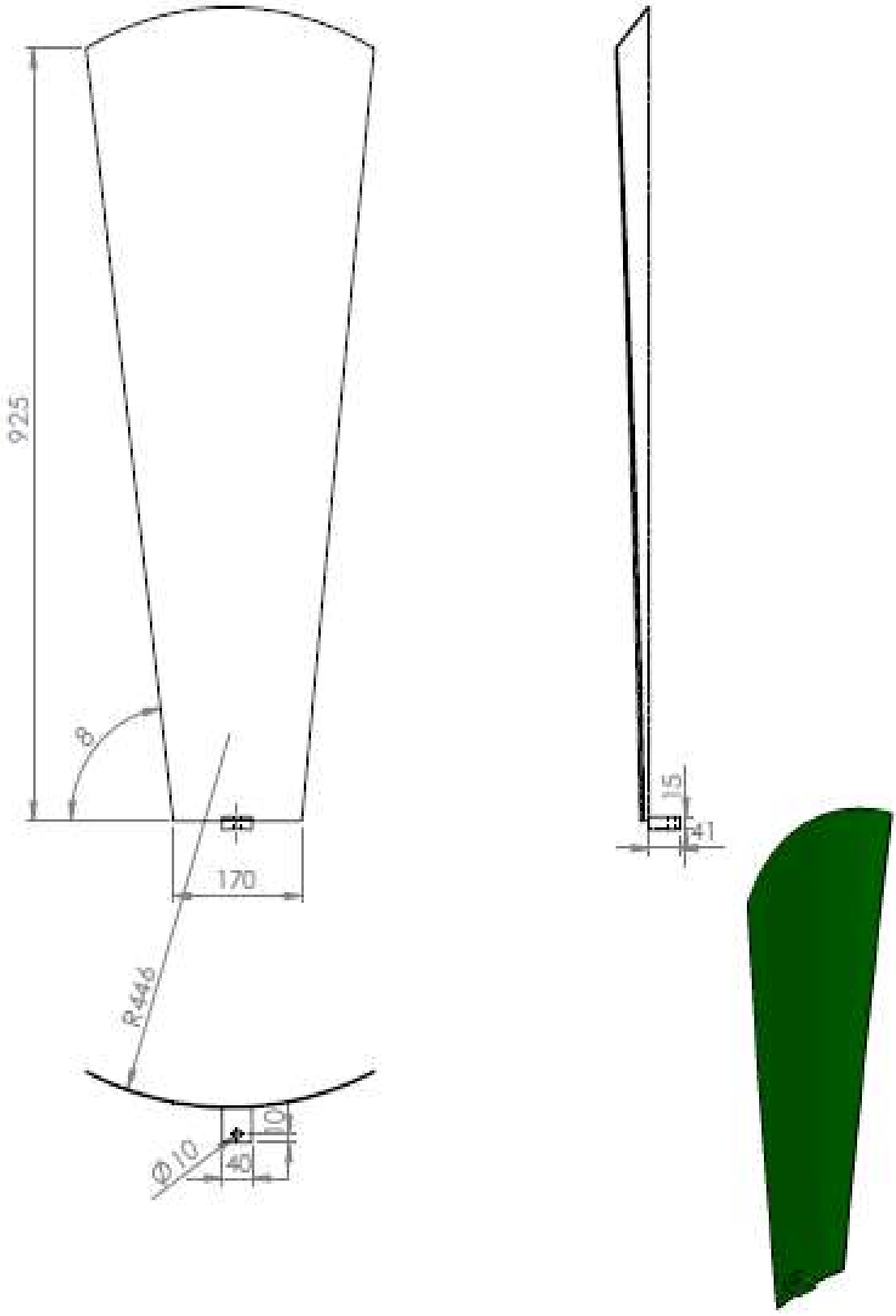
VIEW
SCALE 1 : 7



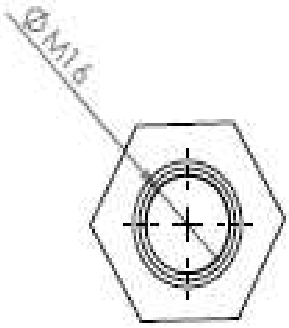


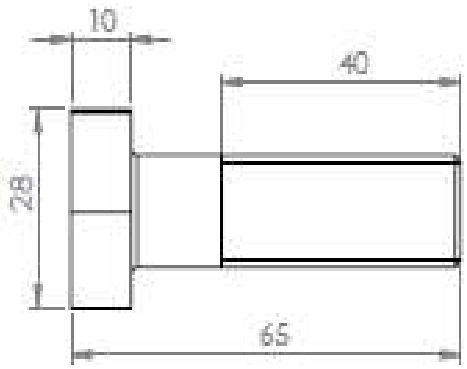


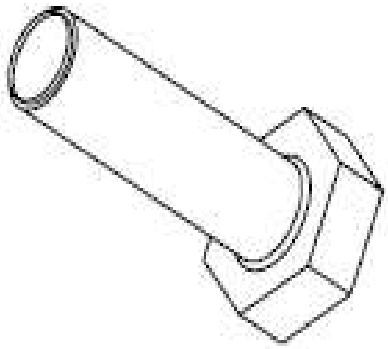
Universite Dr yahia fares a Medea		
Echelle:1-7	ROTOR	Da: 07/06/2014
M :EURO		



Universite Dr yahia fares a Medea		
Echelle:1-7	pale	Da: 07/06/2014
M :EURO		A 4



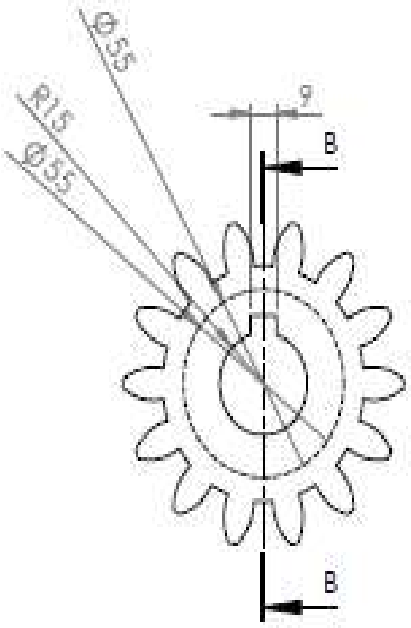


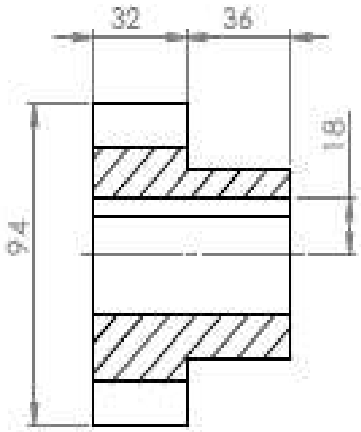


Universite Dr yahia fares a Medea

Echelle:1-1

Da: 07/06/2014





SECTION B-B



Universite Dr yahia fares a Medea		
Echelle:1-1	pignon	Da: 07/06/2014
M :EURO		A 4

`

CONCLUSION GÉNÉRALE

La spécificité de ce travail réside dans la compréhension globale des éoliennes ainsi que le choix de leur installation.

Pour ce qui est le tracé des différentes cartes de vitesses mensuelles moyennes à 10 m du sol, ce dernier constitue un apport considérable à l'évaluation des ressources énergétiques éoliennes de l'Algérie. Suite à nos recherches dans la littérature, nous avons constaté il y'à un des études qui ont permis de fournir des informations sur la répartition géographique du vent en fonction des mois de l'année. Ils ont permis ainsi de faire une première identification des régions dites ventées tells que : Tlemcen, Tenes, Chelef, Meliana, Adrar, Bechar, In Saleh, Timimoun et Tindouf, ces derniers sont dotées d'un important potentiel éolien pouvant, selon les besoins ils seront constituées comme des candidates à l'exploitation de cette énergie.

Le but du présent document était le dimensionnement et la conception d'un mécanisme fonctionnel en s'aidant d'un outil informatique, à savoir le logiciel de conception SolidWorks Etant donné que le sujet traitant de la protection de l'environnement et l'utilisation de l'énergie renouvelable est d'actualité le monde, nous avons dirigé notre choix de mécanisme dans ce sens et choisis de concevoir une éolienne (pompe éolienne).

Al' aide des calcule de résistance et l'étude technologique nous avons pu déterminer le mode d'assemblage entre les oranges constitutifs, le type de matériau, la géométrie permettant l'économie de matière et un fonctionnement sécurisé.

Nous avons aussi cherché à faciliter l'opération de maintenance et de démontage-montage des différents organes.

En résumé une ébauche de conception d'une pompe d'éolienne. Concernant le coté mécanique, un choix différent d'organes, des solidWorks (simulations), flambage, résistance des assemblages permettrai d'affiner la conception.

Références bibliographiques:

[1] **:** Évolution de la puissance installée par pays en MW source Windpower Monthly / Eurobserver (2009).

[3] : Bulletin des Energies Renouvelables - N°3 Juin 2003 / par : Mmme L. Hamane Oran .

[4]. Données de vent utilisées proviennent de l'Office National de la Météorologie (ONM).

l'Office National de la Météorologie (ONM).

[5]: Kasbadji Merzouk N. et al, 2005 calcul l'éolienne – Oran .

[6] : Rachid MAOUEDJ et al : **Étude des performances d'un système éolien. Application pour des sites algériens /** 13èmes Journées Internationales de Thermique /Albi, France du 28 au 30 Août 2007 .

[7] F. Boukli Hacène : Analyse statistique et élaboration d'un atlas éolien de la vallée du Cheliff. / Revue des Énergies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) /, N. Kasbadji Merzouk et L. Loukarfi.

[8] Mémoire de Fin d'Etude (**Dimensionnement et conception dune éolienne a axe horizontale)** Présenté par :HADBI Ramadane azeddine 2012 – Tlemcen .

[9] : Mémoire de Fin d'Etude (**Dimensionnement d'un Système de Pompage d'Eau Potable pour les Sites de Tlemcen et Adrar)**

Présenté par : Melle Meriem CHADEL Université Abou Bekr BELKAID de Tlemcen (2008) .

[10] : Manual de instalacióny mantenimiento Juan y David Bornay, S.L.

Paraje Ameraors, s/n

Apartado de Correos 116

España

[11] : bulletin des Energies Renouvelables publication Dr Maiouf BELHAMEL (CDER) 2012 .

[12] : Cour des énergies Renouvelables (Boualem zeroual).