

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Electromécanique**

Spécialité : **Electromécanique**

Thème

Étude d'une éolienne de puissance domestique .

L'encadreur : **Dr. Mohammed Khechana**

Présenté par :

-Moulati Mohcen

-Rebiha Abd Raouf

-Bouznada Mohammed Issam

-Zoubeidi Ahmed Billal


2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

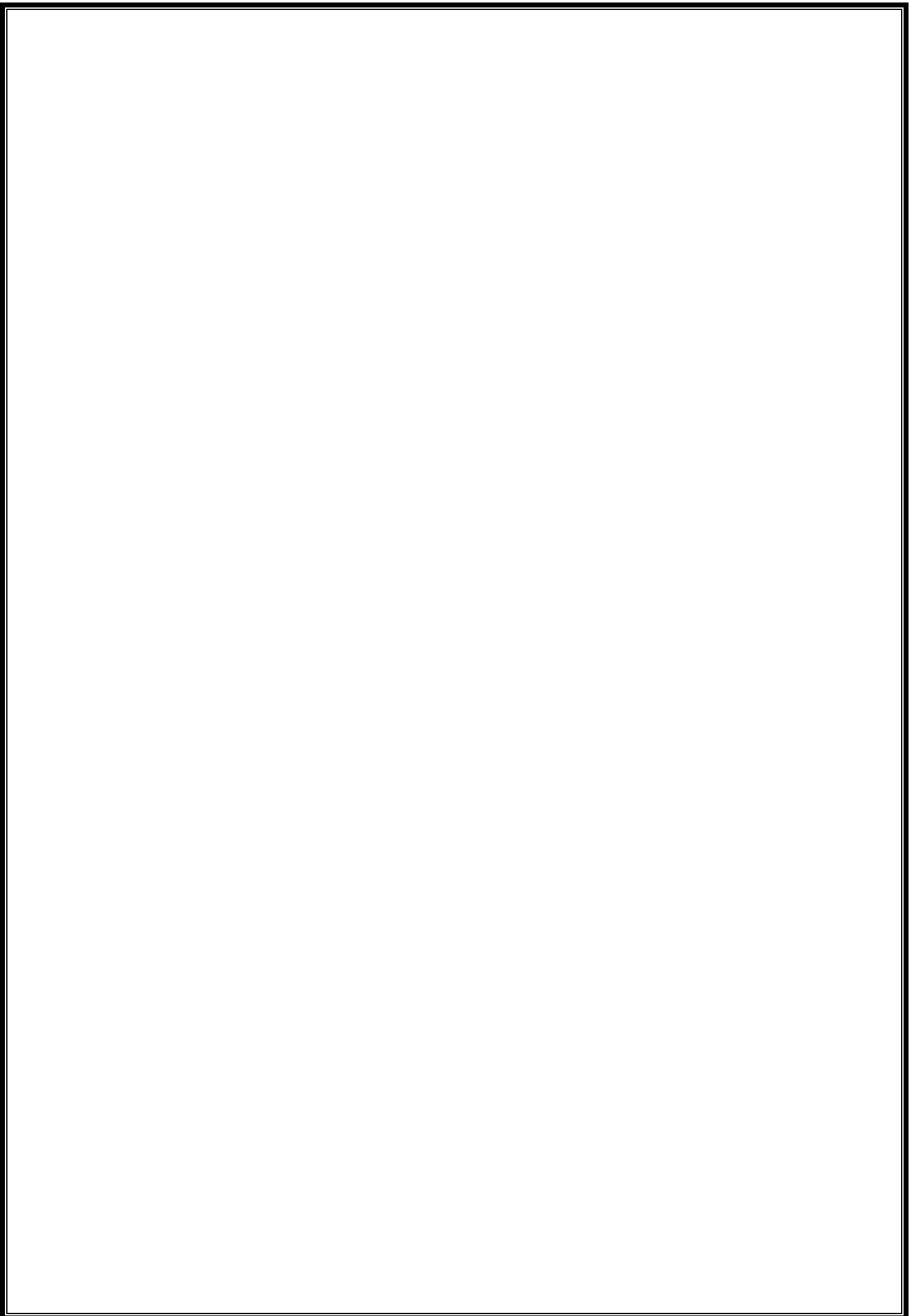
لَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ * ... يَرْفَعُ اللَّهُ ا
وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ۗ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ
*

صدق الله العظيم

المجادلة / الآية 11



Nous dédions cet humble travail:
À nos chers parents pour leur moral et leur soutien
Financières, pour les encourager et
Les sacrifices qu'ils ont endurés,
Que Dieu les protège et les préserve.
À nos frères et sœurs
Pour nos grandes familles
A tous nos collègues, en particulier ceux
Classe électromécanique pour 2022



ملخص :

يتكون مشروع الدراسة الهندسية هذا من تصميم شفرات توربينات الرياح قادرة على إنتاج قوة 10 كيلوواط عند خرج مولد متزامن. المشروع يتضمن بالضرورة تصميم المحور ، وتحجيم معين المكونات الميكانيكية مثل عمود النقل وكذلك اختيار مضاعف السرعة والمحمل. المهمة صعبة بسبب العدد الكبير من المعلمات التي يجب أخذها في الاعتبار على حد سواء الديناميكا الهوائية والميكانيكية. سيكون من الضروري أن تبدأ من مجموعة من ملفات التعريف الشفرات المقترحة في البداية بالإضافة إلى بعض الخصائص الميكانيكية المفروضة على التوصل إلى حل يرضي التفويض. تتكون المنهجية المستخدمة من عمليات محاكاة وحسابات الكمبيوتر بالتناوب ، في الهدف من اختيار ملف الشفرة الأنسب لتلبية الاحتياجات المنصوص عليها في دفتر الشروط. سيتم أخيرًا تشكيل الجزء الدوار لتوربينات الرياح من ملف الشفرة تم اختياره ليتمكن من تحليل سلوكه من حيث التعب و الظواهر الاهتزازية. بالنظر إلى نطاق المشروع والوقت المتاح ، جوانب معينة من التصميم لن تدرس. ومع ذلك ، ستتم مراجعة هذه في الفصل 6 في التغييرات والتوصيات ذات الصلة.

RÉSUMÉ :

Créer ce projet d'étude d'ingénierie à partir de la conception des aubes de turbine, produire une puissance de 10 kW à la sortie synchrone de la scène nommée d'après la circonférence, mise à l'échelle, 0,3, 0,3, circonférence mécanique telle que l'arbre de transmission et le mouvement est une tâche difficile en raison du grand brassage de paramètres qui doivent être pris en compte sur l'aérodynamique et la mécanique, il semble que les préparatifs au début commenceront à exécuter le code. La méthodologie utilisée consiste à alterner simulations informatiques et calculs, dans le but de sélectionner le fichier de code le plus approprié pour répondre aux exigences énoncées dans le cahier des charges. Le rotor de l'éolienne sera enfin usiné à partir d'une bobine de pale sélectionnée pour pouvoir analyser son comportement en termes de fatigue et de phénomènes vibratoires. Compte tenu de l'envergure du projet et du temps disponible, certains aspects de la conception ne seront pas considérés. Cependant, ceux-ci seront examinés au chapitre 3 dans les modifications et recommandations connexes.

ABSTRACT:

Create this engineering study project from the design of turbine blades, produce 10 kW power at the synchronous output of the stage named after the circumference, set to 0, scale, 3, cir mechanical conference such that the transmission shaft and the movement is a difficult task due to the large mixing of parameters that must be taken into account on the aerodynamics and the difficult mechanics, tifié the exé paré the code. The methodology used consists of alternating computer simulations and calculations, with the aim of selecting the most appropriate code file to meet the requirements set out in the specifications. The wind

turbine rotor will finally be machined from a blade coil selected to be able to analyze its behavior in terms of fatigue and vibration phenomena. Given the scope of the project and the time available, certain aspects of the design will not be discussed. However, these will be discussed in Chapter 3 in related changes and recommendations.

Les mots clés :

Le titre : Étude d'une éolienne de puissance domestique .

Les Chapitres :

Chapitre I : Etude bibliographique sur les éoliennes .

Chapitre II: Estimation de l'énergie requise.

Chapitre III: Choix et calcul des différents composants de l'éolienne mise à l'étude .

SOMMAIRE

Table de matière

Introduction générale..... 1 et 2

Chapitre I : Etude bibliographique sur les éoliennes .

I.1.Introduction.....3
I.2. Nature du Vent.....3
I.3. Définition de l'énergie éolienne.....3
I.4. Les types d'éoliennes.....5
I.5. Principaux Composants.....6
I.6. Configuration des pales.....7
I.7. Vitesse d'enclenchement/vitesse de coupure.....7
I.8. Interaction Pale/Vent.....8
I.8.1. Terminologie.....8
I.8.2. Théorie des ailes.....9
I.8.3. Vitesse Induite.....12
I.8.4. Effet d'extrémité et déflexion de l'écoulement.....13
I.9.Conclusion.....16

Chapitre II: Estimation de l'énergie requise.

II.1.Introduction.....17
II.2 .Theories aérodynamiques.....17
II.2.1 La théorie de l'écoulement axial (the axial momentum Theory).....17
II.2.2 La théorie de l'élément de pale.....19
II.2.3 Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale.....24
II.2.3.1 Calcul de la forme optimale de la pale.....25
II.2.3.2 Calcul des efforts aérodynamiques sur le rotor30
II.2.4 Energie requise.....31
II.3.Conclusion.....32

SOMMAIRE

Chapitre III: Choix et calcul des différents composants de l'éolienne mise à l'étude .

III.1.Introduction.....	33
III.2.Expérimental.....	33
III.2.1 Hypothèses de base pour la conception du mat	33
III.2.1.1 Choix du diamètre et de l'épaisseur de la tour.....	33
III.2.2 Flèche au sommet du mat	34
III.2.3 Démarche de détermination des champs de déplacement, de contraintes, de déformations et de coefficient de sécurité	34
III.3. Simulation	35
III.3.1. Conception du mat	35
III.4. Conception du pale.....	39
III.5.Conclusion	43

Liste des figure

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Enregistrement de vitesse de vent	3
Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure I.3 : Principaux organes du système de conversion éolien.....	4
Figure I.4 : éolienne horizontale.....	5
Figure I.5 : éolienne Darrieus.....	5
Figure I.6 : éolienne Savoniu.....	6
Figure I.7 : Principaux composants de l'éolienne moderne.....	6
Figure I.8 : Définition de l'angle azimutal.....	7
Figure I.9 : Courbe de Puissance.....	8
Figure I.10 : Terminologie.....	8
Figure I.11 : Forces agissant sur une aile.....	9
Figure I.12 : Force agissant sur une pale d'éolienne.....	10
Figure I.13 : Forces axiale et tangentielle dans le repère générale.....	11
Figure I.14 : Forces axiale et tangentielle dans le référentiel de la pale.....	12

SOMMAIRE

Figure I.15: Triangle des vitesses.....	13
Figure I.16: Schéma d'écoulement.....	13
Figure I.17: Correction du coefficient de portance.....	14
Figure I.18: Vitesse induite.....	15
CHAPITRE II :	
Figure II.1: L'écoulement axial de l'air.....	17
Figure II.2 : L'écoulement de l'air à travers un élément annulaire.....	19
Figure II.3 : Section d'un élément de la pale à un rayon.....	21
Figure II.4 : Distribution optimale de la corde profil NACA 63-421.....	29
Figure II.5 : Angle optimal de vrillage profil NACA 63-421.....	29
Figure II.6 : Distribution de l'effort axial le long de la pale.....	30
CHAPITRE III:	
Figure III.1 : Forces appliquées sur le mat et le rotor.....	33
Figure III.2 : Dessin du mat.....	36
Figure III.3 : Le mat maillée	36
Figure III.4 : Distribution du champs de contraintes sur le mat	45
Figure III.5 : Distribution du champs de déformations sur le mat.....	37
Figure III.6 : Distribution du champs de déplacement (flèche) du mat	38
Figure III.7 : Mat haubané.....	38
Figure III.8 : Dessin de la pale à section variable (en longueur et en profil) dans l'environnement CATIA.....	40
Figure III.9: Le mat maillée (Environnement ANSYS).....	41
Figure III.10 : . Encastrement de la pale sur la face au pied dans l'environnement ANSYS	41
Figure III.11: Sollicitation de la pale par la force du vent dans l'environnement ANSYS	41
Figure III.12 : Distribution du champs de contraintes sur la pale.....	42
Figure III.13: Distribution du champs de déformations sur la pale	42

SOMMAIRE

Figure III.14: Distribution du champs de déplacement (flèche) de la pale43

Liste de tableaux

CHAPITRE II:

Tableau II.1 : la distribution optimale de la corde et de l'angle de vrillage (profil NACA 63-421).....28

Tableau II.2: donne la répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil. LS1-0417.....28

Table II.3 :Puissance extraite par un aérogénérateur tripale de 10 m de diamètre.....30

CHAPITRE III:

Tableau III.1 : Choix du diamètre et de l'épaisseur de la tour.....34

Introduction générale

L'exploitation de l'énergie du vent a attiré l'attention de l'homme depuis les premières ères. Les utilisations les plus connues sont le pompage de l'eau et le moulinage des grains . Par la suite les scientifiques ont cherché un moyen d'exploiter les éoliennes pour produire l'énergie électrique qui est basée sur l'énergie mécanique .

A l'heure actuelle, les éoliennes sont devenues un moyen de réaliser d'importantes économies d'énergie . De plus, cette énergie propre . Pour fabriquer des éoliennes concurrentielles, il est impératif de réaliser des machines dont les pales aient des bonnes propriétés aérodynamiques ce qui permet une extraction maximale de l'énergie du vent.

L'objectif de cette étude est de vulgariser les connaissances nécessaires à l'étude et à la réalisation des éoliennes de faible puissance, c'est à dire capable d'alimenter une maison. Une telle puissance suffisante peut être aux alentours des 10kW.

L'étude, la conception et la réalisation d'une éolienne repose beaucoup de disciplines et de compétences diverses. citons : l'aérodynamique, calcul des structures, simulation , fabrication et bien d'autres .

L'éolienne utilise des pales qui peuvent être vrillées et à sections variables . Un profil de pale est responsable sur la vitesse d'écoulement et par conséquent sur la vitesse de rotation et du couple du rotor . La détermination de cette forme géométrique joue un rôle important sur le rendement énergétique de l'éolienne .

Le but de ce travail est la vulgarisation de construction des éoliennes de faible puissance . Si les particuliers arrivent à étudier, concevoir et réaliser leurs propres éoliennes , on peut contribuer à l'autosuffisance en matière de consommation énergétique des particuliers .

Sachant que le coût du kWh produit par une petite éolienne industrielle reste plus cher que celui produit par une éolienne de faible puissance, cette raison ne justifie aucunement la continuité de consommation de l'électricité produit par les moteurs thermiques .

Ce travail est divisé en trois chapitres . Le premier est consacré sur l'étude générale des éoliennes . Le deuxième chapitre est consacré sur la façon d'estimer le besoin d'énergie pour

INTRODUCTION GÉNÉRALE

une maison et le dernier chapitre est réservé au calcul, conception et simulation du mat et d'une pale du rotor de l'éolienne .

CHAPITRE I : ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE SUR
LES ÉOLIENNES .

I.1.Introduction

L'étude bibliographique des éoliennes nécessite la connaissance des tous les types de machines, de leurs encombrements, leurs puissances, leurs implantations et la détermination de l'énergie récupérée et par la suite la calcul de l'énergie requise pour approvisionner une maison .

I.2. Nature du Vent:

Les charges du vent ont un impact important sur le mat et le rotor, notamment dans la conception de structures telles que les éoliennes qui doivent par nature être placées dans des zones où les vents sont forts.

Le document 1 montre un modèle d'enregistrement de la vitesse du vent à partir d'un dispositif composé de 3 capteurs placés à des hauteurs différentes sur un même mât à 500 mètres, lors d'une rafale de vent.

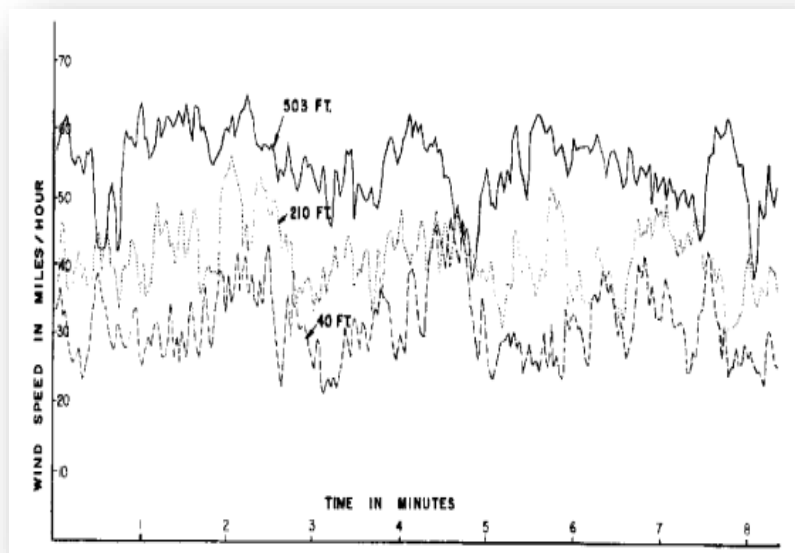


Figure I.1 : Enregistrement de vitesse de vent

I.3. Définition de l'énergie éolienne:

Une éolienne est un appareil qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig.3.1).

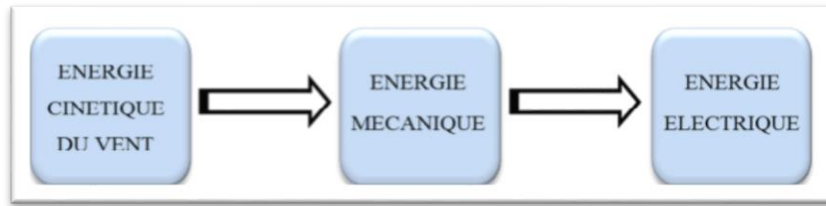


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

Le Système Eolien est constitué d'un générateur électrique entraîné par l'hélice de l'éolienne puis un multiplicateur de vitesse, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig.3.2

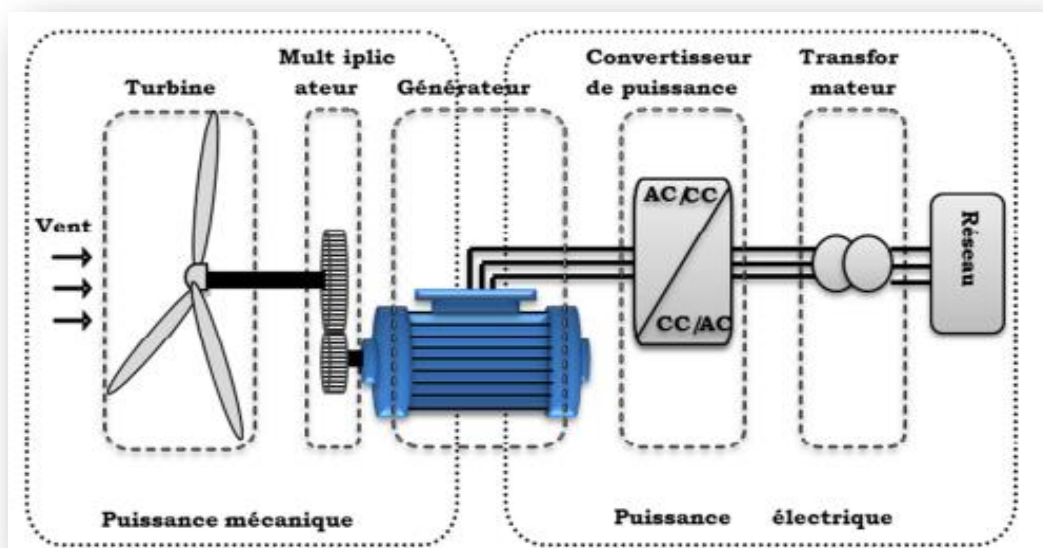


Figure I.3 : Principaux organes du système de conversion éolien

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, donc pas de déchets, elle est en corrélation saisonnière L'énergie électrique est plus demandée en hiver qu'en été et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée. Cette énergie est un peu aléatoire dans le temps, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions pour les machines classées industrielles c'est-à-dire qui produit quelques Mégawatts.

I.4. Les types d'éoliennes:

- L'éolienne horizontale



Figure I.4 : éolienne horizontale

- L'éolienne verticale :

1/L'éolienne Darrieus



Figure I.5 : éolienne Darrieus :

2/ L'éolienne Savonius :



Figure I.6 : éolienne Savonius

I.5. Principaux Composants

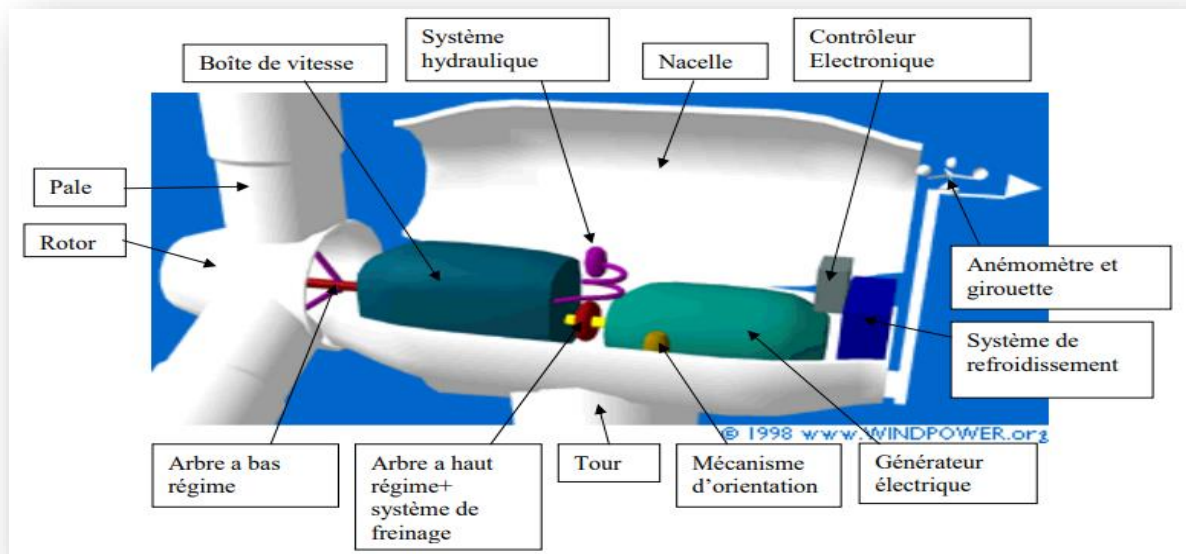


Figure I.7: Les composants de base des éoliennes

- ✓ Mécanisme d'orientation
- ✓ Boîte de vitesse
- ✓ Anémomètre et girouette
- ✓ Système de refroidissement

I.6. Configuration des pales :

L'étude portera sur une éolienne tripale.

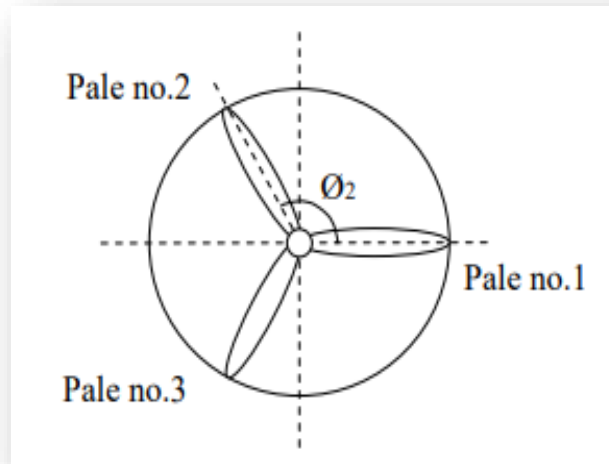


Figure I.8 : Définition de l'angle azimutal

I.7. Vitesse d'enclenchement/vitesse de coupure :

Il est indispensable de limiter le fonctionnement de l'éolienne quand la vitesse de vent dépasse une certaine valeur. Au dessus de cette valeur, la taille de la colonne doit être plus importante pour résister à des sollicitations élevées. Il existe une vitesse à partir de laquelle la machine ne peut plus de produire de l'énergie plus que ça.

Dans les applications domestiques ou rurales, comme le pompage de l'eau, il est souvent désirable que la turbine commence à tourner pour des vitesses de vents incidents aussi faibles que possible. la figure 5 montre trois modes de fonctionnement peuvent être définis :

- Avant la « Cut in speed » et après la « cut off speed », les pales sont placées en position d'arrêt, parallèles au vent incident. De cette manière, elles ne sont que très peu soumises aux charges de vent, mais ne produisent aucune énergie.

- Entre la « cut in speed » et la « rated speed », le rotor tourne à faible vitesse et commence à extraire de l'énergie.

- Entre la « rated speed » et la « cut off speed », le rotor atteint sa vitesse de rotation maximum prévu lors de la conception. C'est le régime de fonctionnement optimal de l'éolienne. Elle est maintenue constante malgré l'augmentation de vitesse du vent incident grâce à l'utilisation d'une boîte de vitesse, ainsi que d'un système de régulation des charges. En effet, certaines éoliennes ont la possibilité de faire tourner les pales sur leur axe, jouant ainsi sur l'angle d'attaque et donc le taux de production d'énergie. Sur cette plage de vitesse, l'énergie produite est considérée comme étant le maximum possible.

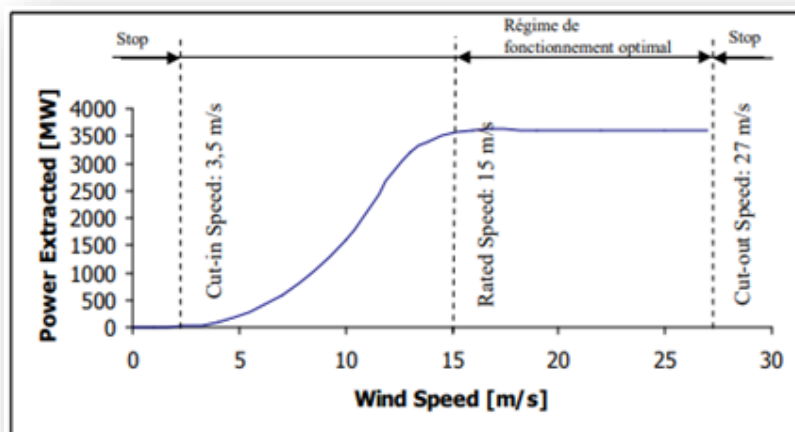


Figure I.9 : Courbe de Puissance

I.8. Interaction Pale/Vent:

I.8.1. Terminologie:

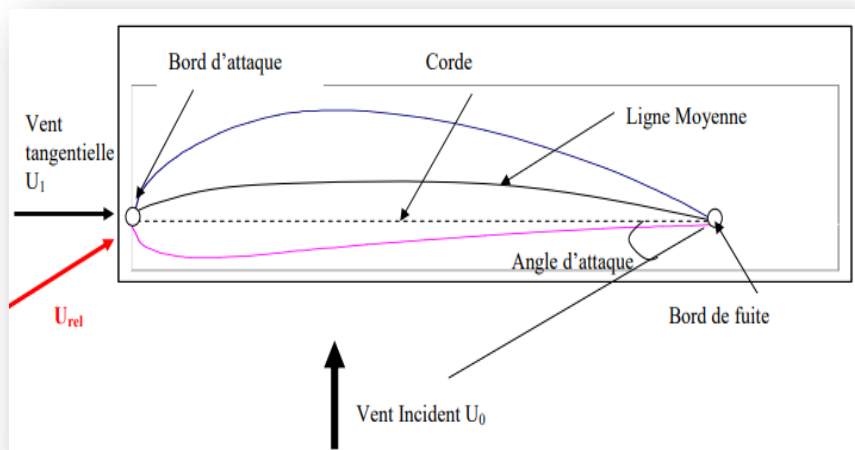


Figure I.10 : Terminologie:

I.8.2. Théorie des ailes :

Quand un obstacle est mis dans un fluide et possède un mouvement relatif par rapport au fluide dans lequel il est plongé, la **traînée** F_D est définie comme la composante de la force résultante, parallèle au mouvement relatif. La composante normale F_L au mouvement relatif agissant sur le corps immergé est appelée **portance**.

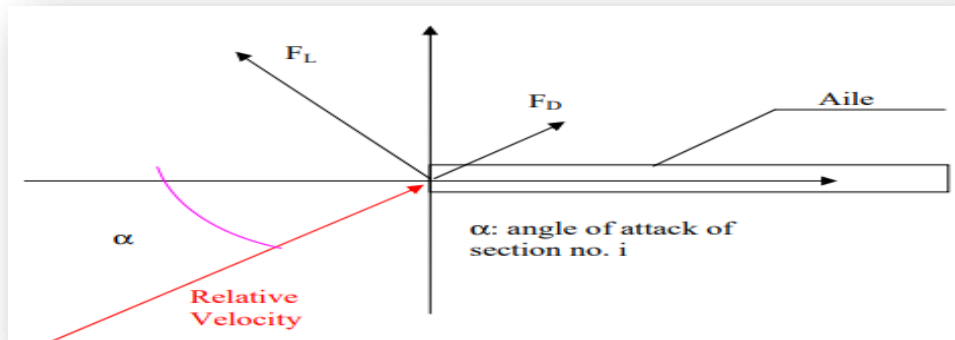


Figure I.11: Forces agissant sur une obstacle (aile)

L'angle d'attaque α est défini comme étant l'angle entre la corde de l'aile et la direction de la vitesse relative.

Selon les théories classiques d'aéronautique, les forces de traînée et de portance sur une pale de géométrie donnée peuvent être décrites de la manière suivante:

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot U^2 \\ F_D &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot U^2 \end{aligned} \quad (\text{I.1})$$

Où ρ est la masse volumique de l'air. A est l'aire projetée du corps immergé. C_L et C_D sont respectivement les coefficients de portance et de traînée. Ils sont fonction de la nature et de la forme du corps immergé dans le fluide, de la valeur du nombre de Reynolds caractérisant la nature de l'écoulement et de l'angle d'attaque.

Considérons maintenant une section de pale d'éolienne:

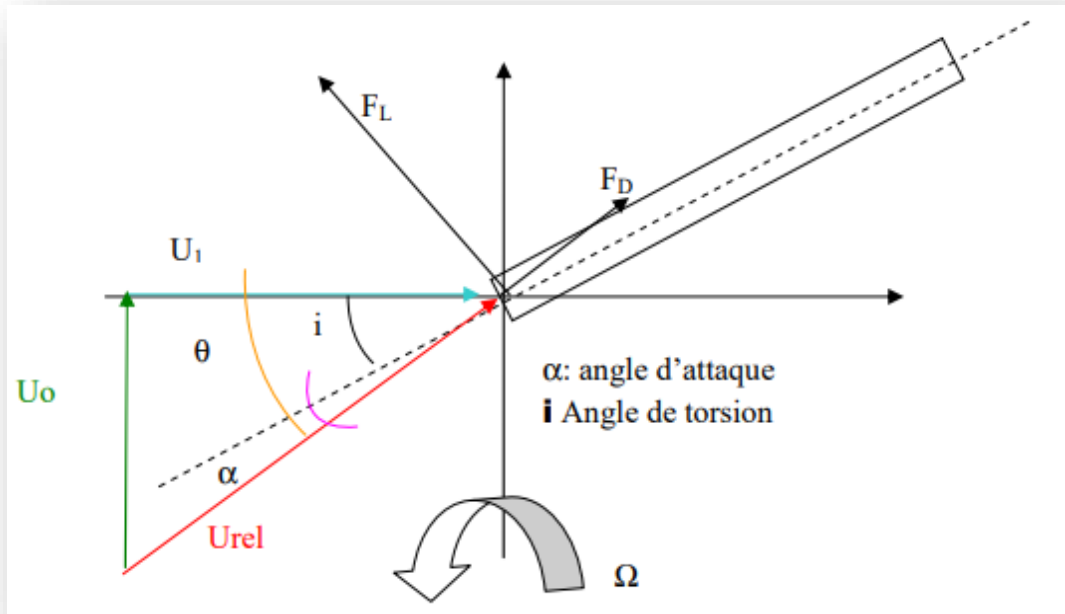


Figure I.12 : Force agissant sur une pale d'éolienne

Le vent incident est caractérisé par sa vitesse U_0 . Sous l'effet de ce dernier, les pales commencent à tourner. Ceci induit la création d'un écoulement perpendiculaire au flux incident. Cet écoulement de vitesse U_1 possède une vitesse variant linéairement le long de la pale:

$$U_1 = \Omega \cdot r \quad (I.2)$$

Où Ω est la vitesse angulaire de l'aile et r l'abscisse de la section considérée. Finalement.

$$U_{rel}^2 = \Omega^2 \cdot r^2 + U_0^2 \quad (I.3)$$

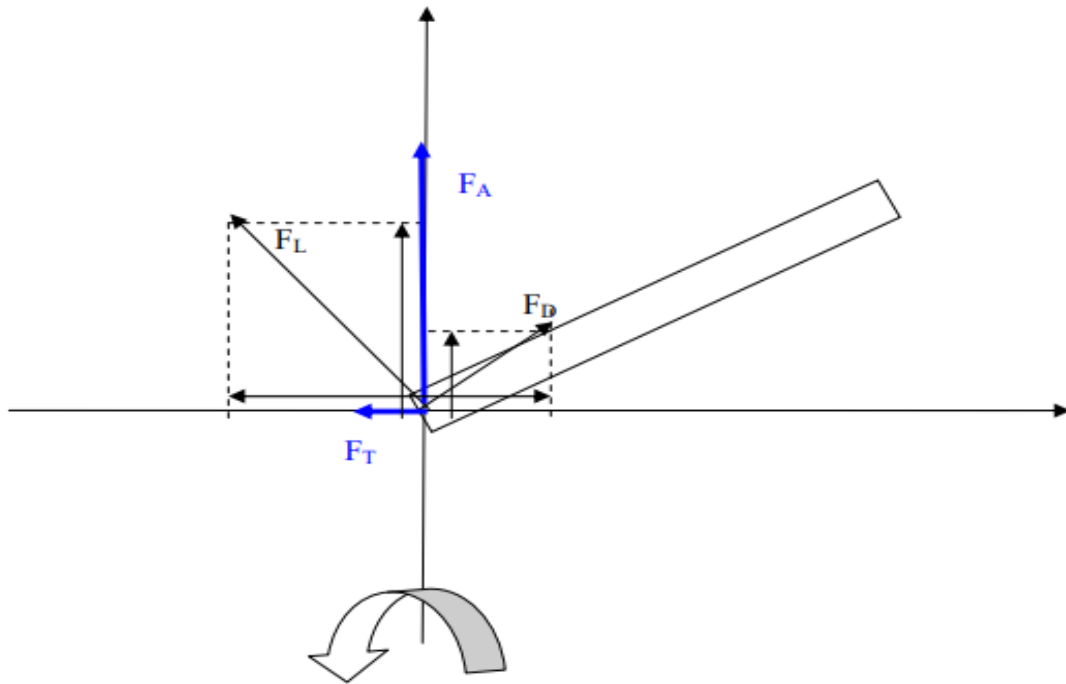


Figure I.13 : Forces axiale et tangentielle dans le repère générale

$$F_T = F_L \cdot \sin \theta - F_D \cdot \cos \theta$$

$$F_a = F_L \cdot \cos \theta + F_D \cdot \sin \theta \text{ (I.4)}$$

La force tangentielle fournit la poussée utile sur l'arbre. La force axiale ne fait que charger la structure. En considérant les équations , on peut facilement comprendre que pour augmenter la poussée sur l'arbre et donc l'énergie que l'on peut extraire du vent, il nous faut augmenter les forces de portance et diminuer les forces de traînée. Un angle d'attaque optimum peut être défini pour maximiser le ratio entre CL/CD et ainsi atteindre une force tangentielle maximum.

Du fait de la variation de U_1 , la direction du vecteur vitesse relative vu par la pale aura tendance à venir tangenter le vecteur U_1 en bout de pale. Ceci implique la variation de l'angle d'attaque le long de la pale. Un angle d'attaque trop petit implique des valeurs de coefficient de portance trop petites alors qu'un angle d'attaque trop important va entraîner un phénomène de palier, se traduisant aussi par une perte de portance pouvant aboutir au décrochage (local ou global) de la pale. Cette dernière ne servira donc plus à la production d'énergie. En pratique, on cherche à assurer un coefficient de portance maximum et constant le long de la pale en introduisant un angle de torsion $i(r)$ dans la pale :

$$\theta(r) = \text{ACOS}\left(\frac{U_1(r)}{U_{rel}(r)}\right) = \text{ACOS}\left(\frac{U_1(r)}{\sqrt{U_1(r)^2 + U_0^2}}\right) = \alpha + i(r) \quad (I.5)$$

Assumons que $\alpha(r) = \alpha_{opt} = \text{constante}$, alors:

$$i(r) = \text{ACOS}\left(\frac{U_1(r)}{\sqrt{U_1(r)^2 + U_0^2}}\right) - \alpha_{optimum} \quad (I.6)$$

On peut finalement déduire les forces agissant sur la pale, dans le repère de cette dernière.

Le but de ce rapport étant une étude structurelle, la force F_T fournissant l'énergie et ne chargeant pas la structure ne sera plus abordée par la suite.

En projetant la force axiale obtenue dans l'équation dans le repère de la pale:

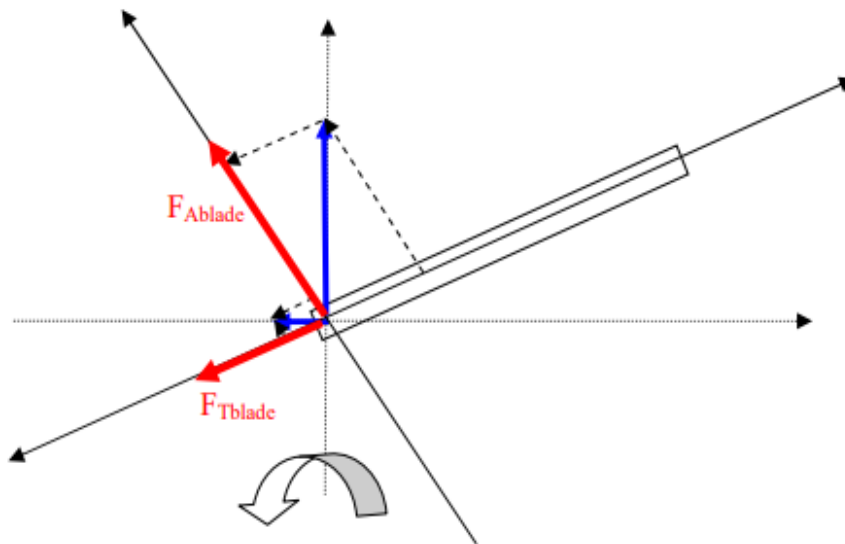


Figure I.14 Forces axiale et tangentielle dans le référentiel de la pale

$$\begin{aligned} F_{T\ blade}(r, z) &= (F_L(r, z) \cdot \sin \theta(r) - F_D(r, z) \cdot \cos \theta(r)) \cdot \sin(i(r)) \\ F_{ablade}(r, z) &= (F_L(r, z) \cdot \sin \theta(r) - F_D(r, z) \cdot \cos \theta(r)) \cdot \cos(i(r)) \end{aligned} \quad (I.7)$$

I.8.3. Vitesse Induite :

L'énergie est extraite par un couple. Le vent exerce un couple sur l'éolienne; la poussée est un sous-produit nécessaire du couple. Les règles de la physique newtonienne stipulent que pour chaque action il existe une réaction égale. Si le vent exerce un couple sur les pales alors les pales doivent exercer un couple sur le vent. Ainsi, cette réaction va impliquer la rotation

du flux d'air à l'arrière du rotor. Le flux dans le sillon aura donc 2 composantes, axiales et tangentielles. Le flux tangentiel est connu comme rotation du sillon.

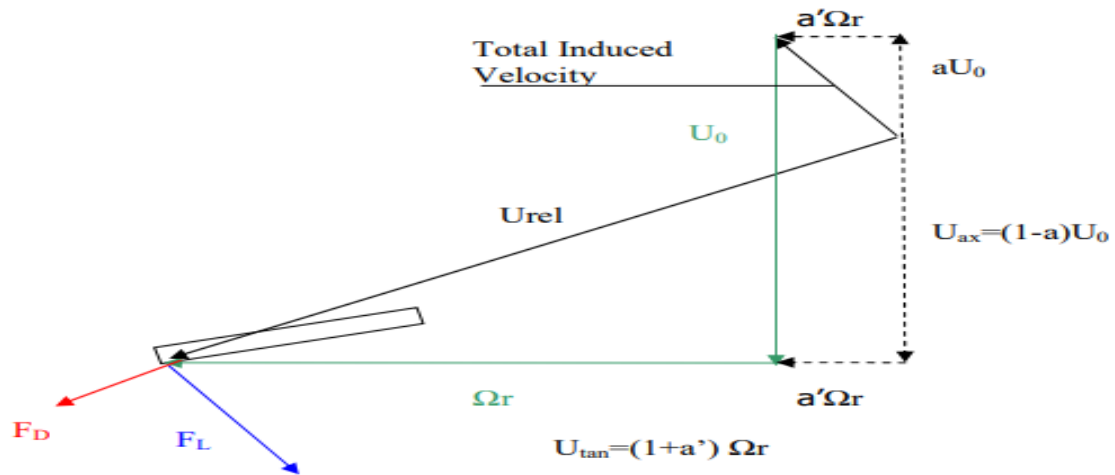


Figure I.15: Triangle des vitesses

En vue d'augmenter l'énergie extraite, il nous faut augmenter le couple exercé sur l'arbre. Pour ce faire, la vitesse du vent incident doit augmenter. La vitesse de rotation des pales va alors croître dans les mêmes proportions, impliquant une rotation plus rapide du sillon. De ce point de vue, l'énergie dépensée pour permettre au sillon de tourner et de l'énergie qui ne sera pas transformée en électricité.

$$\begin{cases} U_{ax} = (1 - a)U_0 \\ U_{tan} = (1 + a')\Omega r \end{cases} \text{ et } \begin{cases} U_{ax\infty} = (1 - 2a)U_1 \\ U_{tan\infty} = (1 + 2a')\Omega r \end{cases} \quad (I.8)$$

I.8.4. Effet d'extrémité et déflexion de l'écoulement:

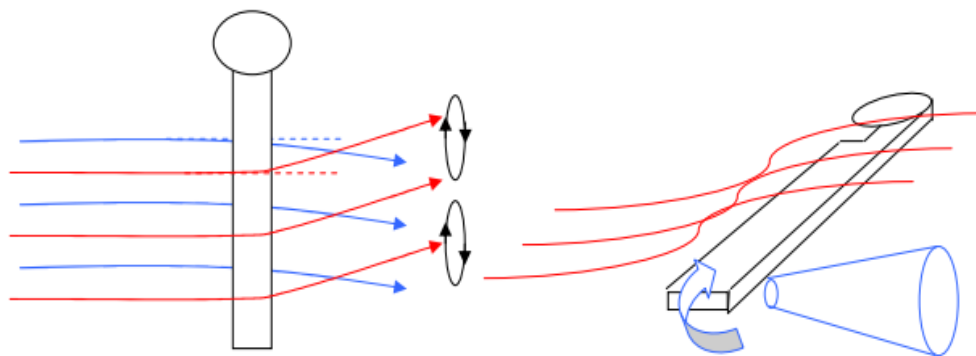


Figure I.16: Schéma d'écoulement

Le schéma complet d'écoulement autour de la pale est affecté. L'écoulement sur la face inférieure est dévié vers l'extrémité de la pale en vue de compenser la perte de pression en bout d'aile alors que l'écoulement sur la face supérieure est détourné vers le centre de rotation sous l'effet de la poussée induite par le flux d'extrémité. Cela entraîne l'instabilité du flux au niveau du bord de fuite. Cette instabilité se traduit par l'apparition de vortex, qui vont rouler jusqu'à l'extrémité et se concentrer en un vortex émanant de l'extrémité (phénomène expliquant les fumées blanches observées au bout des ailes des avions en vol).

La répartition de la portance le long de l'aile est donc affectée. Pour prendre en compte cette perte d'efficacité, il nous faut corriger le coefficient de portance par un facteur de réduction.

Il existe deux moyens de corriger la portance. Le premier est de considérer une loi de répartition elliptique. Le second est d'utiliser le facteur F suivant, trouvé par Prandtl.

$$F = \frac{2}{\pi} \text{ACOS} \left(\exp \left(-\frac{B(R-r)}{2r \sin \theta} \right) \right) \quad (I.9)$$

$F(R)=0$ et $F(0)=1$

Le coefficient de portance doit être multiplié par F pour prendre en compte les pertes d'extrémité.

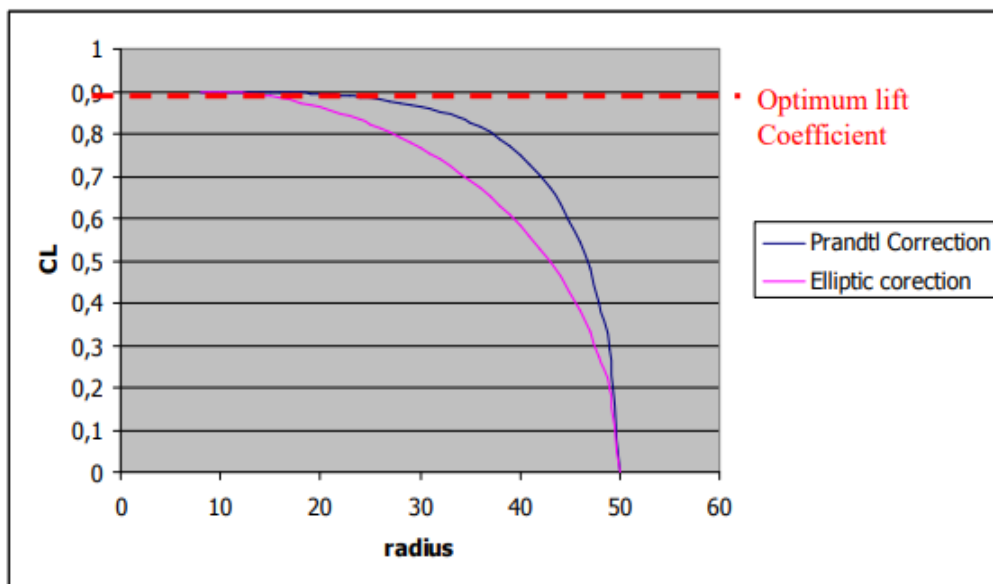


Figure I.17: Correction du coefficient de portance

Pour une vitesse angulaire fixée et un profil de torsion de la pale donné, la vitesse relative du vent par rapport à la pale augmente au fur et à mesure que la pale s'élève pour atteindre sa position la plus élevée (CF. Profil de vent). En d'autres mots, les pertes d'extrémité augmentent vers un maximum pour un angle azimutal de 90 degrés et diminuent vers un minimum pour un angle de 270 degrés.

Une autre conséquence des vortex de bout de pale est la création d'une composante de vitesse parallèle au vent incident. Cette composante est connue sous le nom de « downwash velocity » (vitesse de déflexion). Sa présence implique que la vitesse relative U_{rel} est déviée d'un angle η appelé angle d'incidence induit. Ceci implique que les forces de portance et de traînée s'appliquant sur la pale sont aussi déviées d'un angle η . Pour des raisons de simplicité, il est plus aisé de travailler sans considérer l'influence de l'angle induit dans la direction des vecteurs forces et d'introduire une composante de traînée supplémentaire venant s'ajouter aux composantes déjà existantes : Traînée de forme et traînée de pression.

Il peut être démontré que:

$$C_{DI} = \frac{cC_L^2}{2R\pi} \quad (\text{I.10})$$

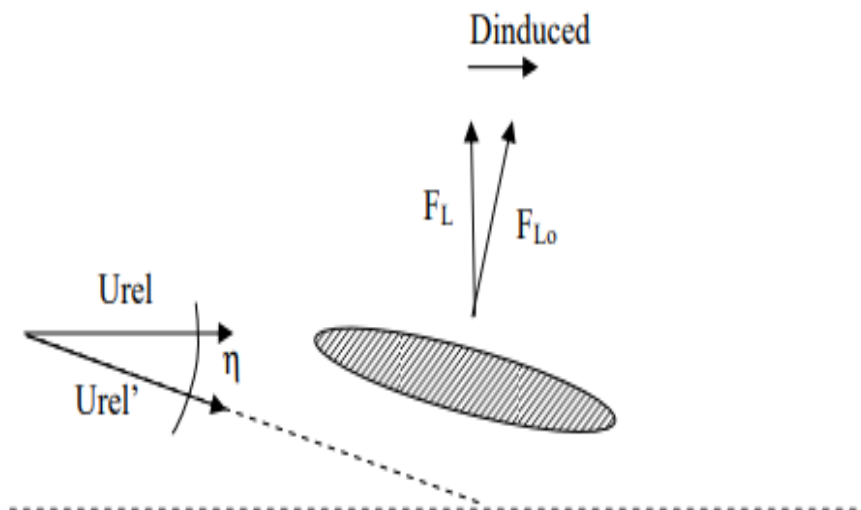


Figure I.18: Vitesse induite

Une fois toutes les corrections effectuées, les facteurs axial et tangentiel a et a' peuvent être exprimés comme suit :

$$\begin{cases} a = \frac{1}{\frac{4\sin^2 \theta}{\sigma F C_L \cos \theta} + 1} \\ a' = \frac{1}{\frac{4\cos \theta}{\sigma F C_L} - 1} \end{cases} \text{ Où } \sigma = \frac{c \cdot B}{2\pi \cdot r} \text{ (I.10)}$$

I.9. Conclusion

La production d'énergie électrique à partir d'éoliennes nécessite une expérience importante dans de nombreux domaines : aérodynamique, mécanique, résistance des matériaux, génie électrique et électronique. Si l'installation d'une machine isolée de faible puissance est relativement aisée, en revanche, la réalisation d'une éolienne pour alimenter une maison de faible consommation (puissance) est travail qui nécessite quelques compétences. Cependant, le développement d'outils informatiques, capables de prendre en charge chacune des étapes nécessaires à la réalisation de ce type de projet et de permettre une meilleure exploitation du potentiel de la source éolienne, permet de profiter et de convertir l'énergie éolienne dans la production d'électricité à grande échelle.

**CHAPITRE II: ESTIMATION
DE L'ÉNERGIE REQUISE.**

II.1.Introduction

L'étude d'une éolienne a pour but de déterminer les paramètres géométriques optimaux de la pale, à calculer les efforts aérodynamiques et la puissance extraite du vent. Afin de déterminer ces informations, des calculs avancés et précis doivent être effectués. citons la puissance, les forces de portance et de trainée et leurs coefficients, la géométrie (profil de la pale, longueur,..), vitesse de l'écoulement et sa relation avec le type de profil calculé .

L'estimation de l'énergie requise est point de départ pour le calcul des différents composants de l'éolienne .

II.2 .Théories aérodynamiques

Il existe plusieurs théories de l'aérodynamique des pales. La combinaison de ces théories permet d'obtenir les informations nécessaires pour le calcul de la puissance récupérable du vent . Le calcul est basé sur les forces et le couple obtenus.

II.2.1 La théorie de l'écoulement axial (the axial momentum Theory) :

Pour aboutir aux expressions de la puissance, force tangentielle (coupe) et vitesse angulaire de la pale, les conventions suivantes sont à respecter :

- Effet pivot complet.
- Effet incompressible.
- La vitesse du vent est constante en dehors du plan tournant.
- Effet de symétrie de rotation.

$$V_0 A_0 = V A = V_1 A_1 = V_i A_i \quad (\text{II.1})$$

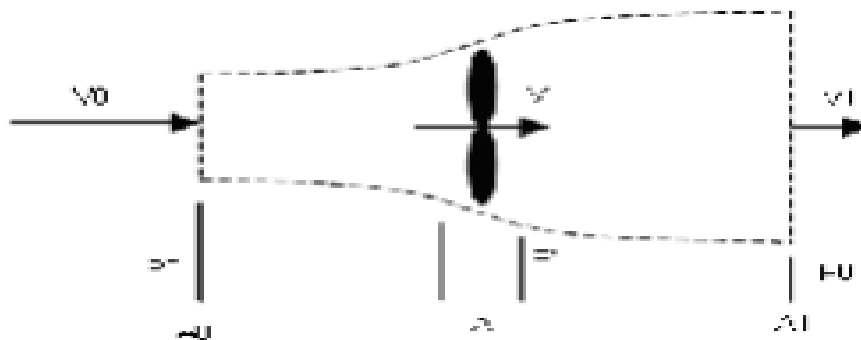


Figure II.1: L'écoulement axial de l'air

Où :

V_i : la vitesse de l'air à la station i

A_i : l'aire de la section du flux d'air à la station i Aussi en appliquant le théorème de variation de la quantité de mouvement, la force axiale du vent sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

$$T = m(V_0 - V_1) = \rho AV (V_0 - V_1) \quad (\text{II.2})$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor :

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 = p + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (\text{II.3})$$

Et celle en aval :

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p' + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (\text{II.4})$$

En combinant (2.3) et (2.4) , on obtient:

$$p - p' = \frac{1}{2}\rho(V_0^2 - V_1^2)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} T &= A(p - p') \\ T &= \frac{1}{2}A\rho(V_0^2 - V_1^2) \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

Les deux équations : (2.2) et (2.5) permettent d'écrire :

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (\text{II.6})$$

La vitesse de l'écoulement de l'air à travers le rotor est la moyenne des deux vitesses, celle en amont et celle en aval du rotor. La puissance extraite du vent est :

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}(V_0^2 - V_1^2) = \frac{1}{2}\rho VA(V_0^2 - V_1^2) \quad (\text{II.7})$$

Le coefficient de puissance C_p est défini comme le rapport entre la puissance extraite et la puissance disponible du vent:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V_0^3 A} \quad (\text{II.8})$$

V peut être exprimé par :

$$V = (1 - a)V_0 \quad (\text{II.9})$$

En utilisant l'équation (2.6):

$$V_1 = (1 - 2a)V_0 \quad (\text{II.10})$$

En substituant V_1 et V dans (2.5), on obtient:

$$T = \frac{1}{2} \rho A V_0^2 4a(1 - a) \quad (\text{II. 11})$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1 - a)^2 \quad (\text{II. 12})$$

L'expression de C_p devient :

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (\text{II.13})$$

La valeur maximale théorique du coefficient de puissance, connue sous le nom de : **limite de Betz**, cette loi peut être obtenue en prenant la dérivée de C_p par rapport à a égal à zéro :

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 4(1 - 3a^2) = 0$$

$$a = \frac{1}{3}$$

$$C_p = \frac{16}{27} \approx 0,59259$$

Le rendement maximal d'une éolienne est de 59,3 %. En pratique, ce rendement n'est jamais atteint en raison des effets suivants :

- Le flux d'air a une composante tournante due à la rotation du rotor.
- La force de traction n'est jamais nulle en raison du frottement.
- Le rotor (l'hélice) a un nombre limité de pales.

II.2.2 La théorie de l'élément de pale :

Les expressions de la puissance extraite et du couple appliqué sur les pales, peuvent être obtenues en considérant l'écoulement de l'air à travers un élément annulaire de rayon r , d'épaisseur dr et de section dA , avec $dA = 2\pi r dr$ (voir Figure 2).

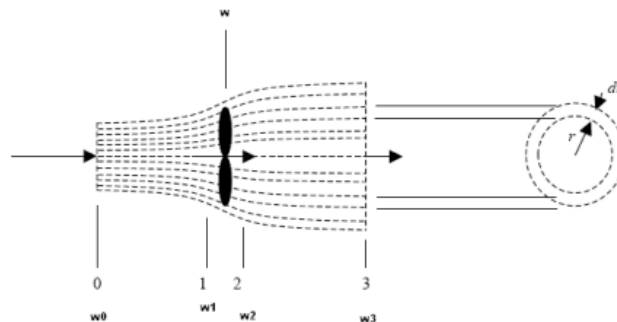


Figure II.2 L'écoulement de l'air à travers un élément annulaire

La force axiale élémentaire est déduite de l'équation (2.11), en remplaçant la surface A du rotor par la section de l'élément annulaire dA , on obtient dans ce cas:

$$dT = 4a(1 - a)\rho V_0^2 \pi r dr \quad (\text{II.14})$$

La variation de la quantité de mouvement de l'air, dans la direction tangentielle, donne la force tangentielle qui s'exerce sur la pale :

$$\begin{aligned} dF_t &= m dV_t = \rho V dA \omega r \\ dF_t &= 2\pi \rho V \omega r^2 dr \end{aligned} \quad (\text{II.15})(\text{II.16})$$

Le couple généré dans la section annulaire est:

$$dQ = 2\pi \rho V \omega r^3 dr \quad (\text{II.17})$$

Puisque la puissance est:

$$P = Q\Omega$$

La puissance élémentaire extraite à travers la section annulaire est:

$$dP = 2\pi \rho \Omega V \omega r^3 dr \quad (\text{II.18})$$

Où :

ω est la vitesse angulaire de rotation de l'écoulement de l'air dans le plan du rotor. Le couple total et la puissance totale deviennent :

$$Q = 2\pi \rho \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (\text{II.19})$$

$$P = 2\pi \rho \Omega \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (\text{II.20})$$

Pour pouvoir calculer la puissance P et le couple Q, il faut déterminer ω . Pour cela on introduit le facteur d'interférence tangentiel a' , défini comme suit :

$$\omega = a' \Omega \quad (\text{II.21})$$

Puisque l'écoulement de l'air en amont, loin du rotor est purement axial, on a :

$$\omega_0 = 0$$

Appliquant la loi de conservation du moment cinétique entre la section 0 et la section 1, située juste avant le plan du rotor, on obtient :

$$\omega_0 r_0^2 = \omega_1 r_1^2 \quad (\text{II.22})$$

Cela implique :

$$\omega_1 = 0$$

On peut conclure que la vitesse angulaire de l'écoulement de l'air subit une discontinuité au niveau du plan du rotor ; cela est dû au couple exercé sur le rotor.

La valeur de la vitesse angulaire de l'air au niveau du plan du rotor est la moyenne de celles situées juste avant et après le rotor :

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (II.23) \quad (II.24)$$

$$\omega_2 = 2\Omega a'$$

Appliquant la loi de conservation du moment cinétique entre la section 2 et la section 3, on obtient :

$$\omega_2 r_2^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (II.25)$$

Etant donné que :

$$r_1 \approx r_2 \approx r$$

L'équation (2.25) devient :

$$\omega_2 r^2 = \omega_3 r_3^2$$

$$\omega_3 = \omega_2 \left(\frac{r}{r_3}\right)^2 \quad (II.26)(II.27)(II.28)$$

$$\omega_3 = 2\Omega a' \left(\frac{r}{r_3}\right)^2$$

Puisque le rayon du sillage croît en s'éloignant du rotor vers l'aval, l'équation(2.28), montre que la vitesse de rotation de l'air diminue plus rapidement en s'éloignant dans le même sens. Cela confirme la deuxième supposition citée ci-dessus.

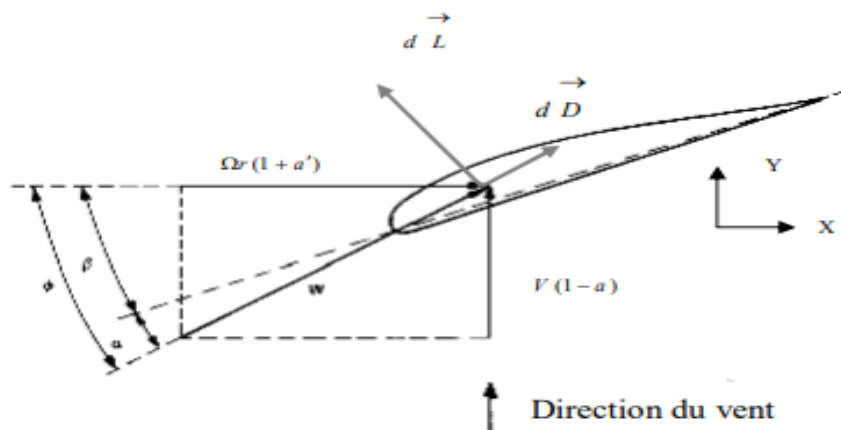


Figure II.3. Section d'un élément de la pale à un rayon r

Soit :

W: vitesse relative de l'air

$$dq = \frac{1}{2} \rho W^2 dA = \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (II.29)$$

On a:

$$C_L = \frac{dL}{dq} \quad (\text{II. 30})$$

$$C_D = \frac{dD}{dq} \quad (\text{II. 31})$$

L: la force de portance (Lift)

D: la force de traînée (Drag)

C_L : le coefficient de portance

C_D : le coefficient de traînée

$$C_x = \frac{dF_x}{dq} \quad (\text{II. 32})$$

$$C_y = \frac{dF_y}{dq} \quad (\text{II. 33})$$

dF_x : est la force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.

dF_y : est la force axiale élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.

D'après la figure 3, on peut écrire:

$$C_y = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (\text{II. 34})$$

$$C_x = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (\text{II. 35})$$

On a :

$$dF_t = B dF_x$$

$$dT = B dF_y$$

Où :

B : est le nombre de pales

D'après la figure 2.3, on a :

$$\alpha = \phi - \beta \quad (\text{II. 36})$$

$$\tan \phi = \frac{(1 - a)V_0}{(1 + a')\Omega r} \quad (\text{II. 37})$$

Où:

a : est l'angle d'attaque (d'incidence.)

b : est l'angle de vrillage.

La force axiale et le couple pour un élément de la pale sont :

$$dT = BC_y dq = BC_y \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (\text{II. 38})$$

$$dQ = Bx dq r = Bx \frac{1}{2} \rho W^2 c r dr \quad (\text{II. 39})$$

L'égalité de l'équation (2.14) avec (2.38) et celle de l'équation (2.17) avec (2.39) donne :

$$\frac{a}{1-a} = \frac{cBC_y}{8\pi r \sin^2 \phi} \quad (\text{II. 40})$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{cBC_x}{8\pi r \sin \phi \cos \phi} \quad (\text{II. 41})$$

Aussi la figure 2.3 permet d'écrire:

$$W = \frac{V}{\sin \phi} = \frac{V_0(1-a)}{\sin \phi} \quad (\text{II.42})$$

D'où:

$$W = \frac{\Omega r(1+a')}{\cos \phi} \quad (\text{II.43})$$

Le coefficient de pleinétude local (local solidity) est défini comme suit:

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r} \quad (\text{II. 44})$$

La résolution des deux équations (2.40) et (2.41), donne les expressions de a et de a' respectivement :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma c_y} + 1} \quad (\text{II. 45})$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma c_x} - 1} \quad (\text{II. 46})$$

$$F = \frac{B\Gamma}{\Gamma_\infty} = \frac{2}{\pi \arccos(e^{-f})} \quad (\text{II. 47})$$

Avec :

$$f = \frac{B(R-r)}{r \sin \phi} \quad (\text{II. 48})$$

Les facteurs d'interférence axial et tangentiel deviennent :

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma c_y} + 1} \quad (\text{II. 49})$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma c_x} + 1} \quad (\text{II. 50})$$

Dans la pratique cette correction a très peu d'influence sur la prévision de la performance de l'éolienne et elle est souvent négligée .

II.2.3 Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale

La propagation de l'équation de Bernoulli pour dériver la pression initiale à travers la section annulaire des pales permet d'écrire en substituant les angulaire de l'air de W à $W + w_2$, où la vitesse est réglée pour maintenir la vitesse inchangée :

$$p + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 = p' + \frac{1}{2} \rho (\Omega + \omega_2)^2 r^2$$

$$p - p' = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 \quad (\text{II. 51})$$

L'effet de la force axiale sur l'élément de l'anneau :

$$dT = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 2\pi r dr \quad (\text{II. 52})$$

L'expression de la force axiale sur l'élément annulaire, peut s'écrire comme suit:

$$dT = 4a'(1 + a') \rho \Omega^2 r^2 \pi r dr \quad (\text{II.53})$$

La division des deux équations (2.14) et (2.53) donne :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{V_0^2} \quad (\text{II.54})$$

Prenant la vitesse spécifique (Tip speed ratio) comme :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

et la vitesse spécifique locale comme :

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_0}$$

L'équation (2.54) devient :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \lambda_r^2 \quad (\text{II.55})$$

L'expression de la puissance extraite dans l'équation (2.20) peut s'écrire :

$$P = 2\pi\rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a)a'r^3 dr \quad (\text{II.56})$$

Ou bien :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_0^3 \cdot \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a)a'r^3 dr \quad (\text{II.57})$$

Le coefficient de puissance C_p est formulé comme suit:

$$C_p = \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a)a'r^3 dr \quad (\text{II.58})$$

Le coefficient de puissance dépend du facteur K tel que:

$$K = a'(1-a) \quad (\text{II.59})$$

Ce coefficient atteint sa valeur maximale $C_{p \max}$ si l'expression K est maximale. Les deux équations (2.55) et (2.59) permettent d'exprimer K en fonction de a . Le maximum de K est atteint si on prend:

$$\frac{\partial K}{\partial a} = 0 \quad (\text{II.60})$$

Cela implique :

$$\frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} = \lambda_r^2 \quad (\text{II.61})$$

L'égalité des deux équations (2.55) et (2.61) permet d'écrire :

$$a' = \frac{(1-3a)}{(4a-1)} \quad (\text{II.62})$$

Cette dernière formule donne la relation entre a et a' afin que le coefficient de puissance soit maximal $C_{p \max}$, cela implique que la puissance extraite par le rotor dans ce cas soit maximale.

II .2.3.1 Calcul de la forme optimale de la pale

La conception d'une forme optimale de la pale d'une hélice implique que la dernière relation (2.62), correspondante à une puissance maximale, soit satisfaite.

Si on adopte l'hypothèse de négliger les frottements dans le sens axial, en prenant $CD = 0$, l'expression de a de l'équation (2.45) devient:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_L \cos \phi} + 1} \quad (\text{II.63})$$

Aussi, l'expression de a' de l'équation (2.46) devient:

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L} - 1} \quad (\text{II.64})$$

Où :

C_L : est la valeur optimale du coefficient de portance .

Si on substitue l'expression (2.62) dans cette dernière équation, on obtient :

$$a = \frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L + 12 \cos \phi} \quad (\text{II.65})$$

L'égalité des deux expressions de a dans les équations (2.63) et (2.65) donne l'équation quadratique suivante dont l'inconnue est C_L :

$$(\sigma C_L)^2 + 8 \cos \phi \cdot \sigma C_L - 16 \sin^2 \phi = 0 \quad (\text{II.66})$$

Cette équation admet deux solutions :

$$\sigma C_L = -4(\cos \phi + 1) \quad (\text{II.67})$$

$$\sigma C_L = 4(1 - \cos \phi) \quad (\text{II.68})$$

La première racine n'est pas acceptable car $C_L < 0$. La deuxième racine donnée par (2.68) donne l'expression optimale de la corde le long de la pale :

$$C = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \phi) \quad (\text{II.69})$$

Pour déterminer l'angle optimal ϕ , et par conséquent l'angle optimal de vrillage b , des transformations similaires sont à envisager. La formule (2.37) peut s'écrire comme suit:

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{(1+a')} \frac{1}{\lambda_r} \quad (\text{II.70})$$

Si on substitue l'expression (2.62) dans cette dernière équation, on obtient :

$$\lambda_r = \frac{(4a-1)(1-a)}{a} \frac{1}{\tan \phi} \quad (\text{II.71})$$

La substitution de l'équation (2.63) dans (2.71) donne :

$$\lambda_r = \frac{(2 \cos \phi - 1)(1 + \cos \phi)}{(1 + 2 \cos \phi) \sin \phi} \quad (\text{II.72})$$

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$\lambda_r = \frac{\cos \phi + \cos 2\phi}{\sin \phi + \sin 2\phi} \quad (\text{II.73})$$

D'où :

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2}\phi} \quad (\text{II.74})$$

On aboutit finalement à :

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (\text{II.75})$$

On déduit l'angle optimal de vrillage β de l'équation (2.36):

$$\beta = \phi - \alpha_{opt} \quad (\text{II.76})$$

Les résultats de la répartition optimale de la corde ainsi que l'angle de vrillage pour deux types de pales (ayant différents profils) sont résumés par les tableaux suivants :

Le tableau 2.1 donne la répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil NACA 63-421.

CHAPITRE II : ESTIMATION DE L'ÉNERGIE REQUISE .

r/R	Corde (m)	Angle de vrillage (Deg)
0,16	0,60	19,3
0,20	0,53	15,2
0,24	0,47	12,1
0,29	0,42	9,7
0,33	0,37	7,9
0,37	0,34	6,4
0,41	0,31	5,3
0,45	0,28	4,3
0,50	0,26	3,4
0,54	0,24	2,7
0,58	0,23	2,1
0,62	0,21	1,6
0,66	0,20	1,1
0,71	0,19	0,7
0,75	0,18	0,3
0,79	0,17	0,0
0,83	0,16	-0,3
0,87	0,15	-0,6
0,92	0,15	-0,8
0,96	0,14	-1,0
1,00	0,13	-1,2

Tableau II.1 la distribution optimale de la corde et de l'angle de vrillage (profil NACA 63-421)

r/R	Corde (m)	Angle de vrillage (Deg)
0,16	0,82	23,3
0,20	0,73	19,2
0,24	0,64	16,1
0,29	0,57	13,7
0,33	0,51	11,9
0,37	0,46	10,4
0,41	0,42	9,3
0,45	0,39	8,3
0,50	0,36	7,4
0,54	0,33	6,7
0,58	0,31	6,1
0,62	0,29	5,6
0,66	0,27	5,1
0,71	0,26	4,7
0,75	0,24	4,3
0,79	0,23	4,0
0,83	0,22	3,7
0,87	0,21	3,4
0,92	0,20	3,2
0,96	0,19	3,0
1,00	0,18	2,8

Le tableau II.2 donne la répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil. LS1-0417.

La figure 4 montre la courbe de la distribution optimale de la corde en fonction de la longueur de la pale pour une pale ayant un profil NACA 63-421.

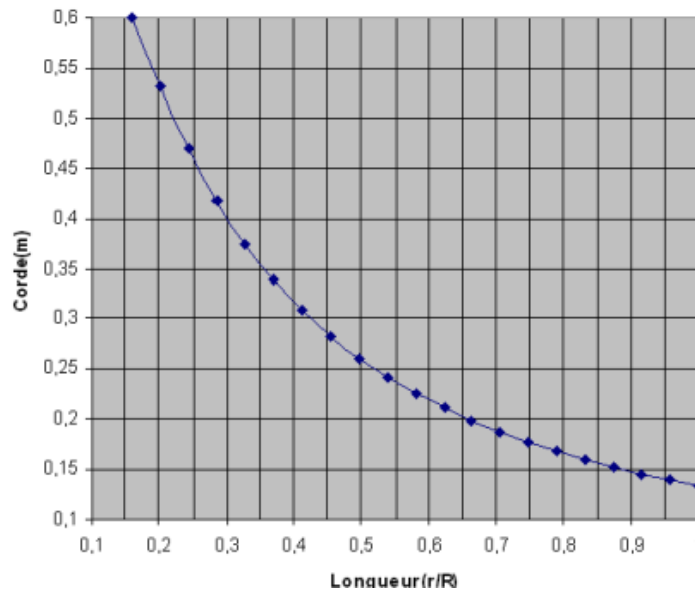


Figure II.4 Distribution optimale de la corde profil NACA 63-421

La figure 5 montre la courbe de la distribution optimale de l'angle de vrillage en fonction de la longueur de la pale pour une pale ayant un profil NACA 63-421.

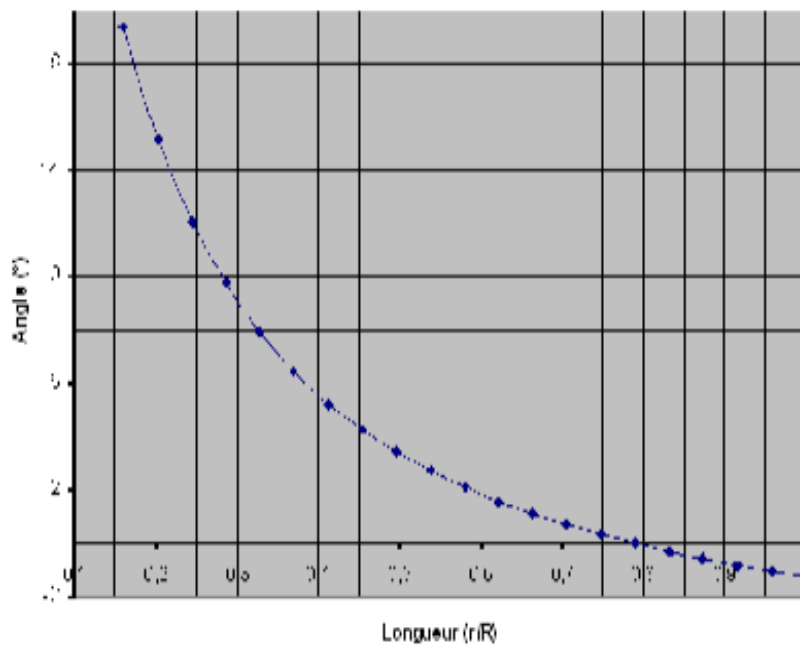


Figure II.5 Angle optimal de vrillage profil NACA 63-421

II.2.3.2 Calcul des efforts aérodynamiques sur le rotor

Après avoir déterminé la forme la plus appropriée et optimale des pales, nous pouvons maintenant calculer les forces agissant sur les pales et l'énergie extraite par le rotor. Pour connaître ce calcul, On prend en compte :

- La vitesse .
- Le rayon de l'hélice est R.
- Propriétés des profils C_L (a) et C_D (a).
- Nombre de pales b.

Les données suivantes sont calculées de la manière décrite dans la section précédente :

- Répartition de l'angle de torsion β (r).
- La distribution de l'accord c (r).

La figure 6 montre l'effet de la force axiale sur la longueur de la lame

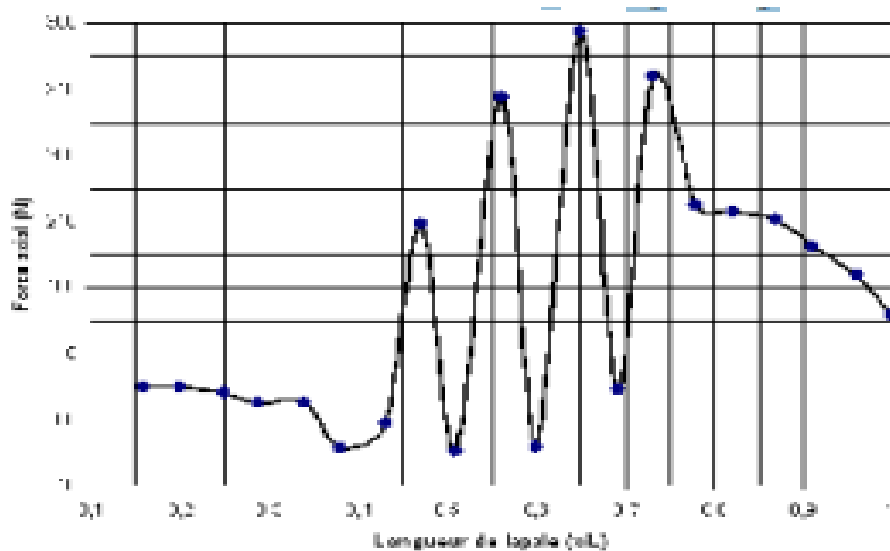


Figure II.6 Distribution de l'effort axial le long de la pale

Profil	Max(C_L/C_D)	Angle (°) d'incidence optimal	Angle de vrillage Max (°)	Puissance extraite (KW)	coefficient de puissance (C_p)
NACA 63-421	152,11	6	19	7,5	0,46
FX66-S196-V1	160,96	8	17	7,2	0,44
LS(1)-0417	125,04	2	23	6,79	0,42
S809	97,38	6	19	6,14	0,38

Table II.3: Puissance extraite par un aérogénérateur tripale de 10 m de diamètre

II.2.4 Energie requise

Après l'exposé des notions théoriques nécessaires à la construction de l'éolienne , on entame le point : Estimation de l'énergie requise . Ici, on suppose une maison qui contient tous les appareils électriques nécessaires, soient :

10 lampes, 02 Télévisions, 01 frigidaire, 01 congélateur, 02 climatiseurs , 01 lave linge, 01 lave vaisselle, 01 robot mixeur, 01 pétrin, 01 fer à repasser, 01 séchoir pour cheveux, 02 chauffages à bain d'huile, 02 PCs, 01 imprimante, 01 pompe à eau, 01 chauffe eau électrique (cumulus).

Dans le tableau suivant, nous montrons les énergies consommées par les appareils ménagers entre les saisons d'hiver et d'été et ensemble consomme le plus d'énergie électrique.

N	Désignation de l'appareil	Nbre	Puissance en W	Consommation hivernale	Consommation Estivale
1	Lampes	10	200	200	100
2	Télévisions,	1	250	250	250
3	Frigidaires	1	1200	1200	1500
4	Congélateurs	1	1200	1200	1500
5	pompe à eau,	1	450	450	500
6	lave vaisselle	1	400	400	500
7	un chauffe eau électrique	1	1200	1200	
8	Climatiseurs	02	4000		4000
9	lave linge	1	250	250	250
10	chauffages à bain d'huile,	2	2400	2500	
11	PCs,	1	70	70	70
12	Imprimante	1	100	100	100
13	robot mixeur	1	100	100	100
14	pétrin,	1	200	200	200
15	séchoir pour cheveux	1	1700	1700	1000
Total		=	13750	=	9420
					=10070

En calculant la consommation d'énergie totale pour les saisons d'hiver et d'été, nous disons que la plus grande consommation d'énergie est celle de la saison d'été, et à partir de là, nous devons prendre en compte l'énergie totale pour la saison d'été, c'est-à-dire que nous avons besoin d'une éolienne capable de générer 10070 W (figure ci-dessus), soit 10 kW . Cela est pour répondre aux besoins d'une maison tout au long de l'année .

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre , nous avons exposé le concepts théoriques nécessaires à la conception d'une éolienne . Ces notions sont à appliquer pour notre cas qui se manifeste par l'étude d'une éolienne capable d'alimenter une maison avec de l'énergie éolien .

L'énergie nécessaire pour alimenter un foyer équipé par la majorité des appareils à usage domestique a été estimée à 10 kW.

CHAPITRE III: CHOIX ET
CALCUL DES DIFFÉRENTS
COMPOSANTS DE
L'ÉOLIENNE MISE À
L'ÉTUDE .

III.1.Introduction

Dans ce chapitre on fait la simulation de du mat exposé aux différents chargements et on estime les valeurs de ses déplacements face au vent. Une autre simulation sera faite sur la résistance et les vibrations d'une pale.

III.2. Expérimental

III.2.1 Hypothèses de base pour la conception du mat.

La tour est supposée comme une poutre encastré à une seule extrémité, libre et charge par l'autre extrémité . L'encastrement est matérialisé par sa fixation au sol et le chargement est concrétisé par le poids du rotor-générateur-nacelle et la force latérale du vent. Fig III.1

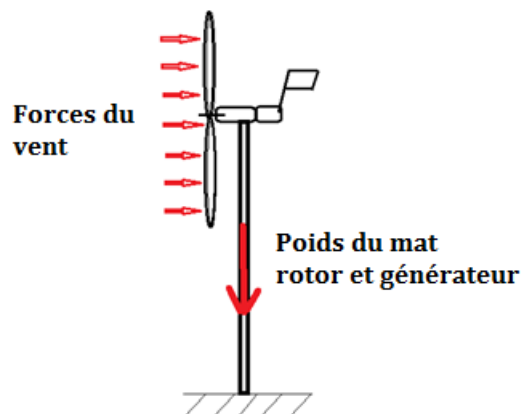


Fig. III.1. Forces appliquées sur le mat et le rotor.

III.2.1.1 Choix du diamètre et de l'épaisseur de la tour

Les tours des éoliennes industrielles sont en général de forme conique. Le diamètre de base du cône est en bas .Le critère essentiel pour les industriels est la minimisation de la déflexion et du poids propre. Pour les éoliennes de faibles puissances, cette forme n'est pas obligatoire . La réduction du poids propre entraîne des économies de coûts. Selon la littérature, de nombreuses cas ont été testés, dont 06 combinaisons ont été présélectionnés et la meilleure a été choisi. Cette étude concernait un mat d'une éolienne industrielle .

Diameter (mm)	Thickness (mm)	Self-weight of the tower (N)	Tip deflection (mm)	Ratio of deflection to self-weight
675	14	79377	497	0.00626
1000	7.5	63849	391	0.006123
1250	5	58711.9	370	0.006301
1500	3.3	52608.5	232	0.004409
1750	2.8	49442.58	261	0.005226
2000	1.7	47976.5	330	0.006878

Tableau III.1 : Choix du diamètre et de l'épaisseur de la tour

D'après le tableau 1, on peut voir que le diamètre D1=1500 mm avec une épaisseur de 5 mm semble être la configuration optimale basée sur les paramètres de déflexion.

III.2.2 Flèche au sommet du mat

La flèche au sommet du mat peut être calculée en appliquant les charges du rotor, du générateur,... Cette déflexion doit être inférieure à 1% de la hauteur totale de la tour.

Les formules de la RDM ne sont pas capables de déterminer directement la flèche des poutres à géométrie compliquée. Dans ce cas, le recours aux codes de calcul qui appliquent la méthode des éléments finis est bien argumenté pour la détermination de la flèche et tout le champ de déplacement ainsi que les champs de contraintes, les champs de déformations et les champs des coefficients de sécurité.

III.2.3 Démarche de détermination des champs de déplacement, de contraintes, de déformations et de coefficient de sécurité

La démarche commence par la conception du mat ou du pale puis on passe par le maillage pour la discrétisation en éléments et finalement le solveur résout l'ensemble de équations nodales pour aboutir finalement aux différents résultats (déplacements, contraintes, déformations et coefficients de sécurité).

III.3. Simulation

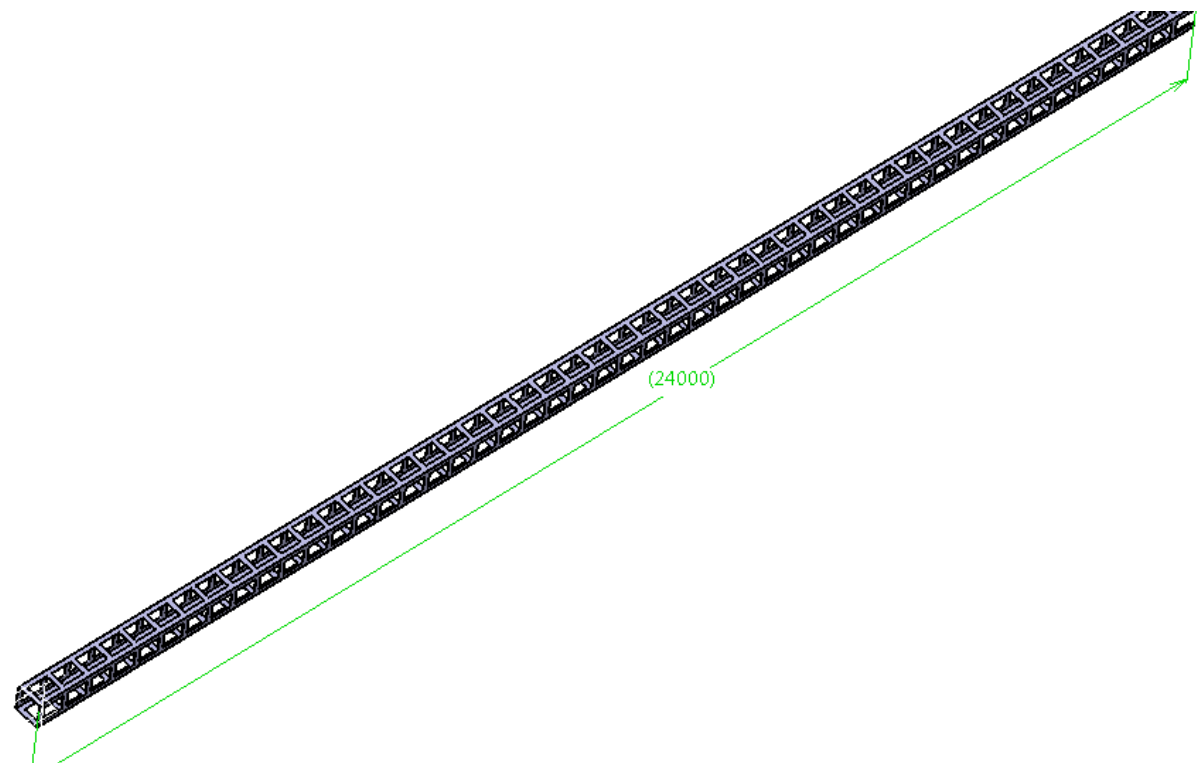
III.3.1. Conception du mat :

Hauteur :

La hauteur optimale du mat qui permet de récupérer l'énergie stable d'un vent se situe entre 22 à 24 m. Il est à mentionner que la partie fondation ne fait pas partie de cette hauteur mais elle doit être préparé à part .

Forme :

La forme du mat d'une éolienne mise à l'étude ne sera pas conique choisie par les industriels . Car la fabrication d'un mat de forme conique est délicate . La forme la plus facile et à portée de particuliers est la forme adopté par la société SONELGAZ pour les anciens poteaux de l'éclairage public .



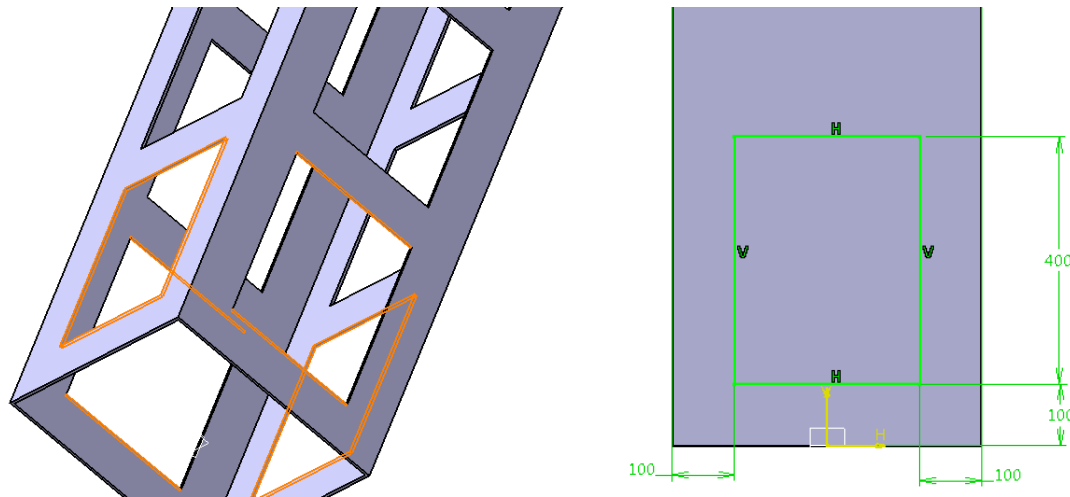


Fig. III.2. Dessin du mat.

Matériau du mat :

Il s'agit d'un acier isotrope ayant les propriétés suivantes :

Module de Young : 2.e+005 MPa	Coefficient de Poisson : 0.3
Limite à la rupture en traction : 460 MPa	Limite d'élasticité en traction : 250 MPa
Limite d'élasticité en compression : 250 MPa	Module de cisaillement: 76923 : MPa

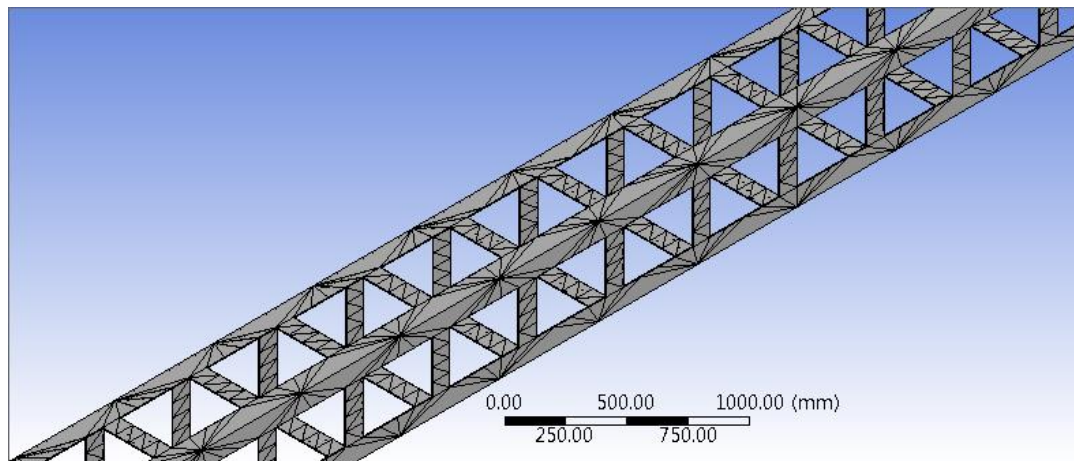


Fig. III.3. Le mat maillé.

Le mat est sollicité par son propre poids appliqué au centre de gravité, par la force du vent agissant latéralement $F_v = 5000 \text{ N}$ et par le poids des 3 pales du générateur et le reste des accessoires tels la boîte des vitesses et la nacelle $P=2000 \text{ N}$.

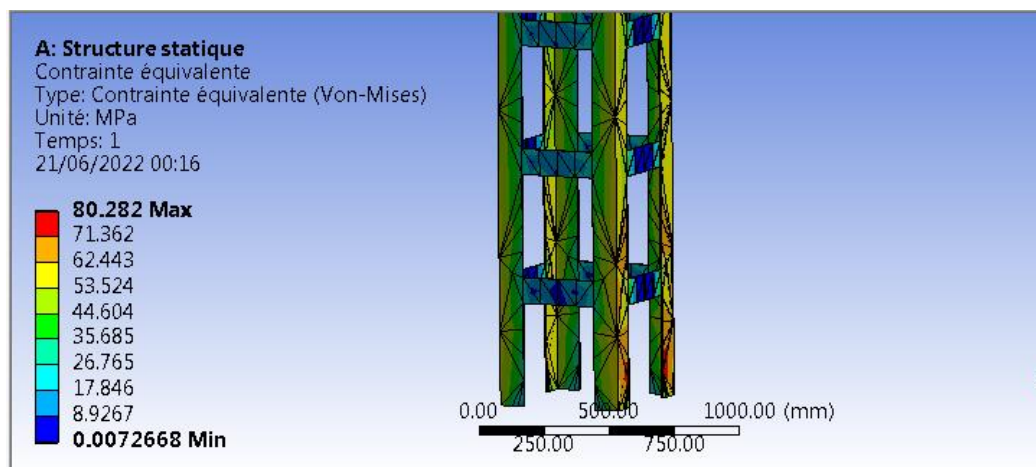


Fig. III.4. Distribution du champs de contraintes sur le mat.

La figure 3.4 montre que la contrainte maximale se situe bien au niveau de l'encastrement avec le sol.

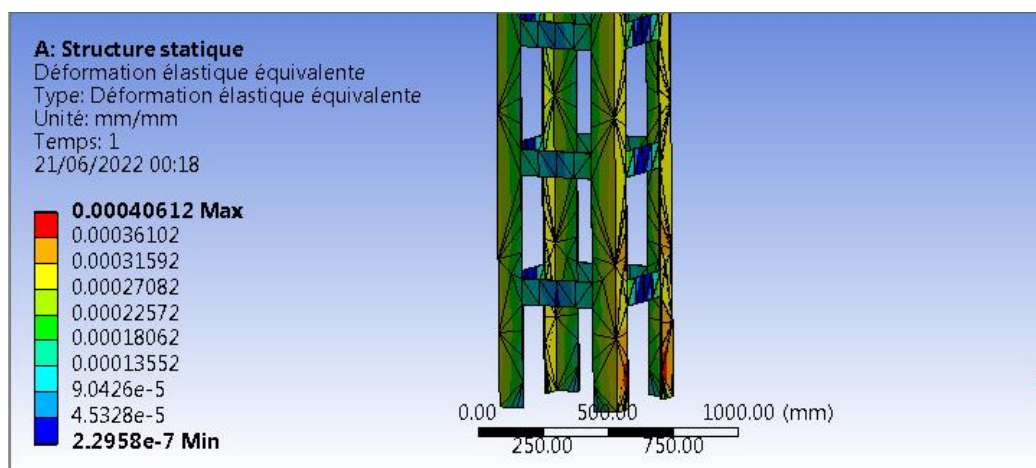


Fig. III.5. Distribution du champs de déformations sur le mat.

La figure 3.5 montre que la déformation maximale se situe bien au niveau de l'encastrement avec le sol. La déformation est liée à la contrainte par la loi de Hook généralisée.

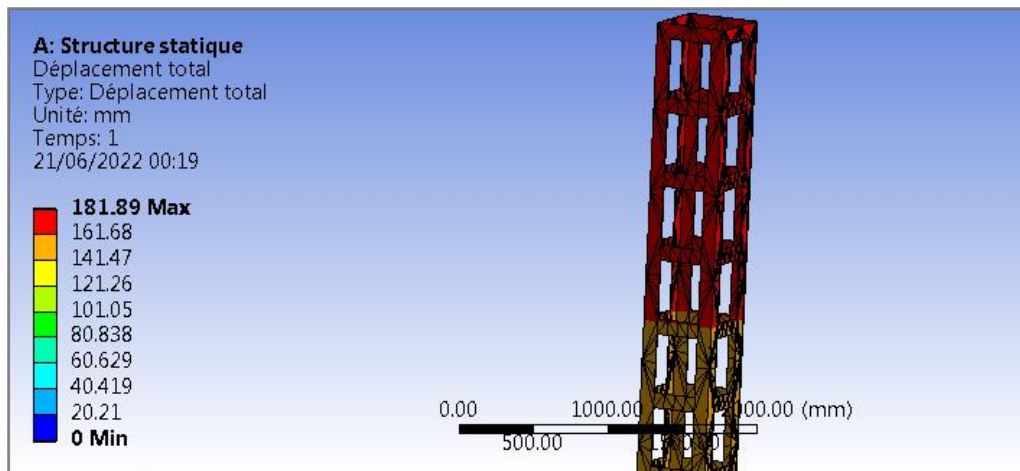


Fig. III.6. Distribution du champs de déplacement (flèche) du mat.

La figure 3.6 montre que le déplacement maximale se situe bien au niveau du rotor, c'est à dire en haut (au sommet du mat). Cette valeur est bien la flèche qui est égale à 181.89 mm.

Puisqu'on a dit plus haut que si la flèche dépasse 1% de la hauteur, on bloque un point du mat. Ce point doit être placé le plus haut possible . Cette décision peut être matérialisé par l'installation de quatre câbles fixés d'une part en un point haut du mat et d'autre part fixés en au sol dans quatre points suffisamment loin de base du mat. Fig.3.7

Si on évalue le 1% de la hauteur du mat, on a : $1\% \times 24000 \text{ mm} = 240 \text{ mm}$ et que la flèche maximale est de 181.89 mm, c'est-à-dire inférieur à 240, donc l'installation des 04 câbles pour que le mat soit haubané n'est pas obligatoire.

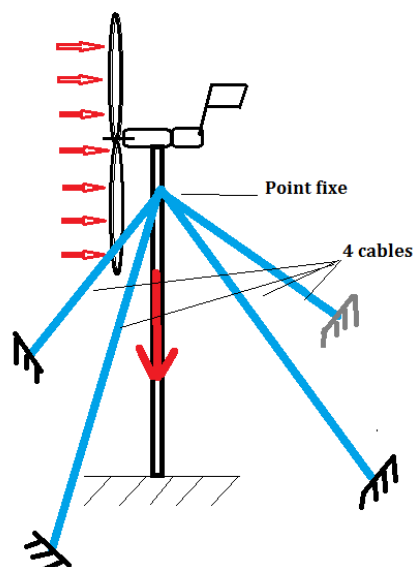


Fig. III.7. Mat haubané

III.4. Conception du pale

Avant d'entamer la conception de la pale, il est judicieux de déterminer le diamètre du rotor construit par les 03 pales et enfin déduire la longueur de la pale .

Revenons à la loi de Betz qui stipule que l'énergie maximale récupérable d'un vent de vitesse v et à travers une hélice de section A est :

$$P_{\text{extraite}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} \cdot P_{\text{incidente}} \quad \text{avec} \quad P_{\text{incidente}} = P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_{\text{amont}}^3 \quad \mathbf{1(III.1)}$$

$$\text{Donc : } P_{\text{Extraite}}^{\text{max}} = (16/27) \times 0.5 \times 1.22 \times S \cdot v^3 \quad \text{d'où} \quad \mathbf{= 0.37 \cdot S \cdot v^3}$$

La puissance demandée est connue, la vitesse du vent est supposée constante pour ces calculs, la section est : $S = \pi D^2 / 4$, donc : $\mathbf{D = 1.855 (P_{\text{Extraite}}^{\text{max}} / v^3)}$ et finalement la longueur de la pale L_p peut être estimée à $D/2$ si on néglige le diamètre du moyeu .

La puissance demandée par un foyer a été évaluée à 10 kW qui est $P_{\text{Extraite}}^{\text{max}} / \eta$ où η est le rendement du système . soit $\eta = 0.9$, alors la puissance demandée par le rotor doit être $10000W / 0.9 = 11000 W$.

La vitesse du vent est choisie en général égale à 22 à 25 km/h; on prend $v = 7 \text{ m/s}$ d'où :

$$\mathbf{L_p = 5.25 \text{ m.}}$$

Forme de la pale :

Pour une vitesse réduite on peut adopter le profil NACA 4412 . C'est une pale de 5.25 m de long, de corde au pied $c = 325 \text{ mm}$.

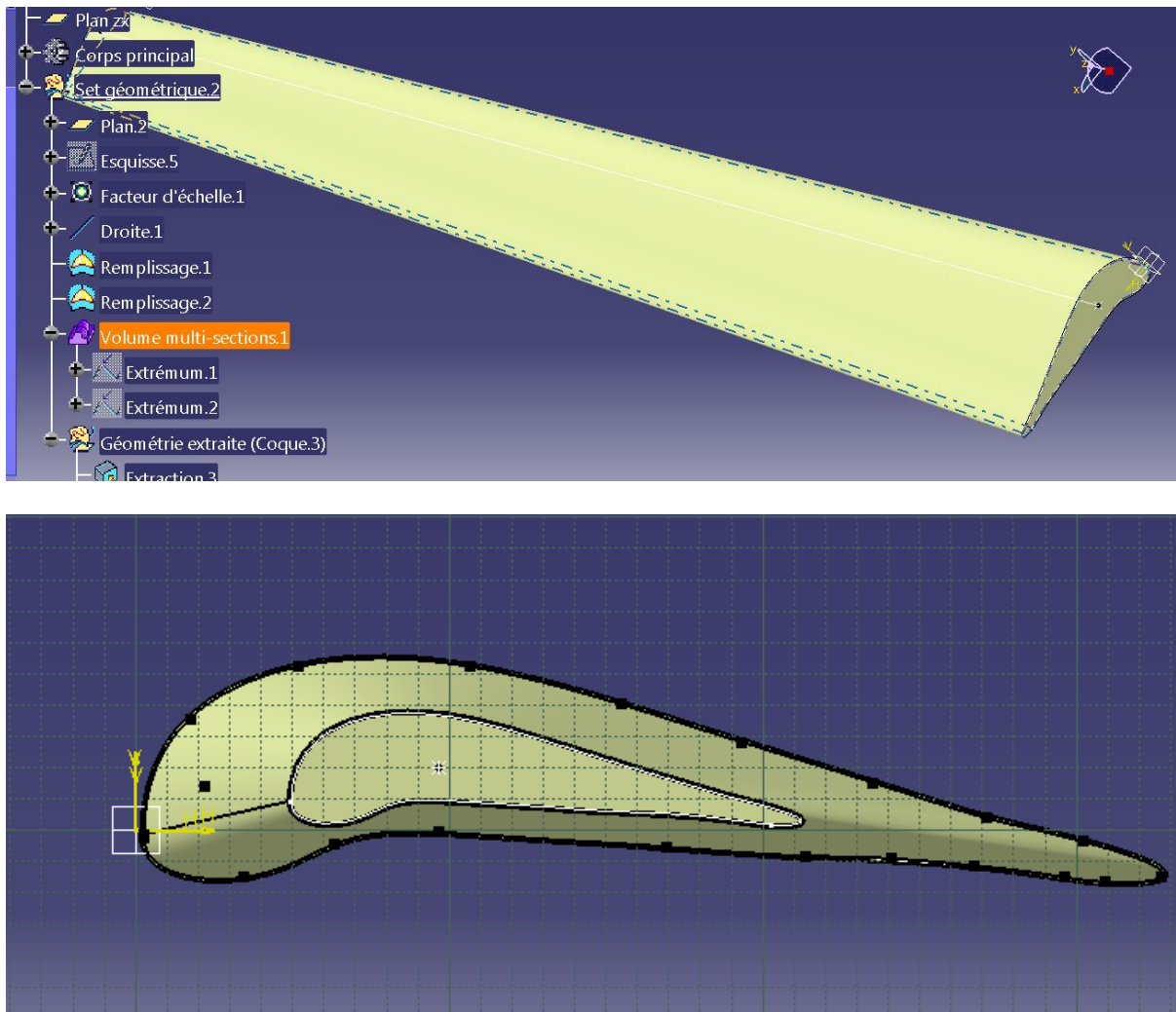


Fig. III.8. Dessin de la pale à section variable (en longueur et en profil) dans l'environnement CATIA.

Matériau de la pale :

Il s'agit d'un matériau générique ayant les propriétés suivantes :

Densité :785.0 kg/m ³	Coefficient de Poisson : 0.3
Limite à la rupture en traction : 46 MPa	Module de Young : 2.e+05 MPa
Limite d'élasticité en traction : 25 MPa	Module de cisaillement: 7692 : MPa
Limite d'élasticité en compression : 25 MPa	

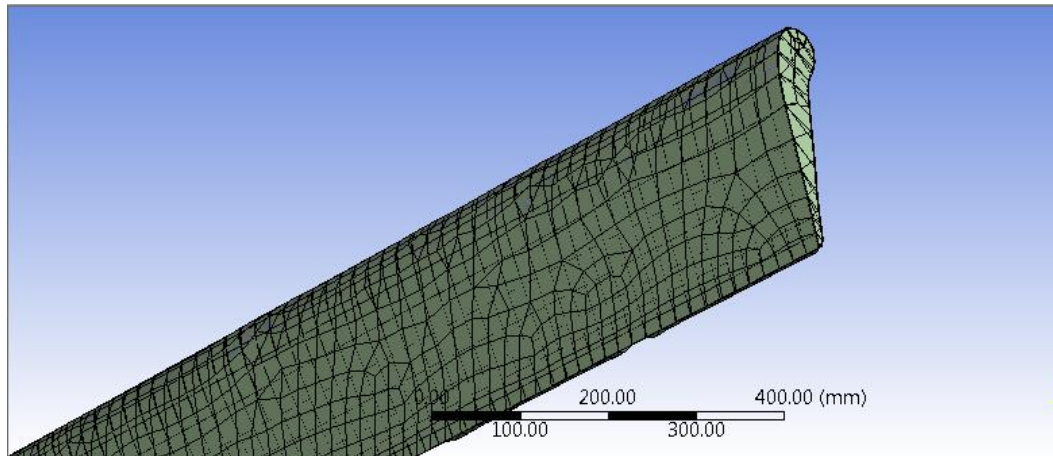


Fig. III.9. Le mat maillé (Environnement ANSYS).

La pale est sollicitée par son propre poids $P=37.4$ kg, appliqué au centre de gravité et par la force du vent agissant latéralement : $F_v = 300$ N .

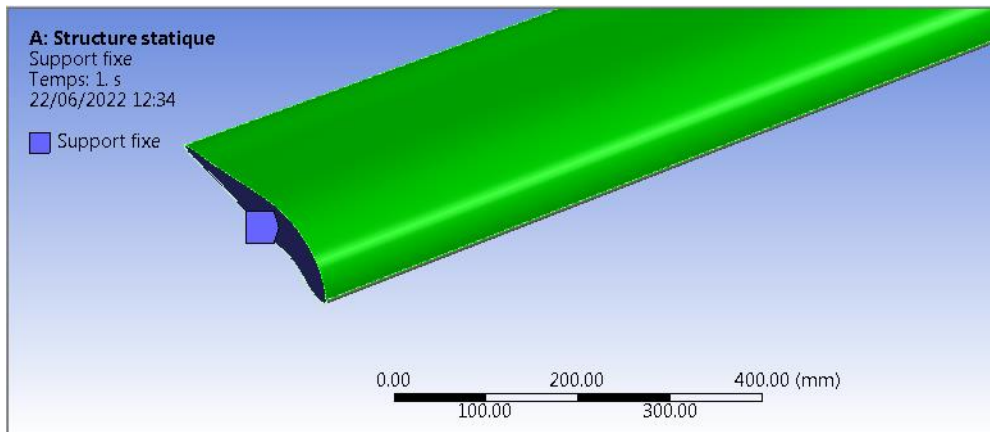


Fig. III.10. Encastrement de la pale sur la face au pied dans l'environnement ANSYS.

Lors de le recherche de la flèche maximale, on a bloqué la face plane au niveau du pied .

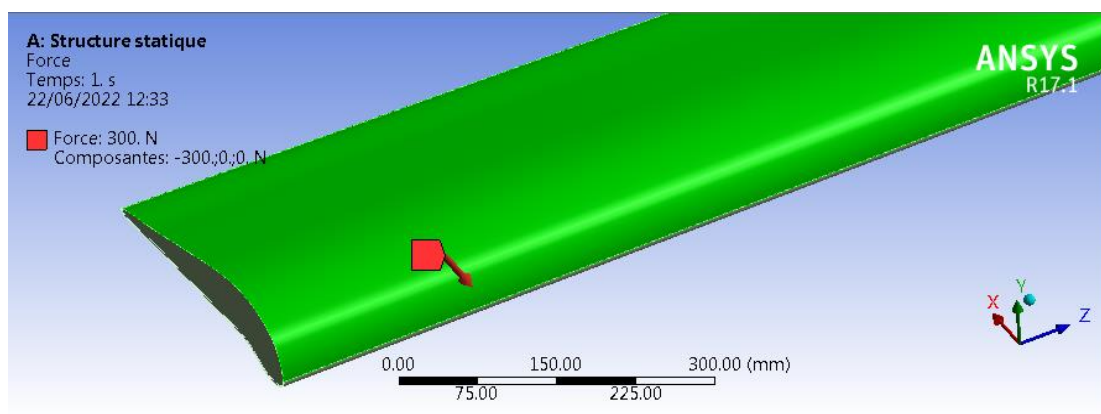


Fig. III.11.Sollicitation de la pale par la force du vent dans l'environnement ANSYS

La recherche des 03 champs de contraintes, de déformations et de déplacements a donnée les distributions suivantes :

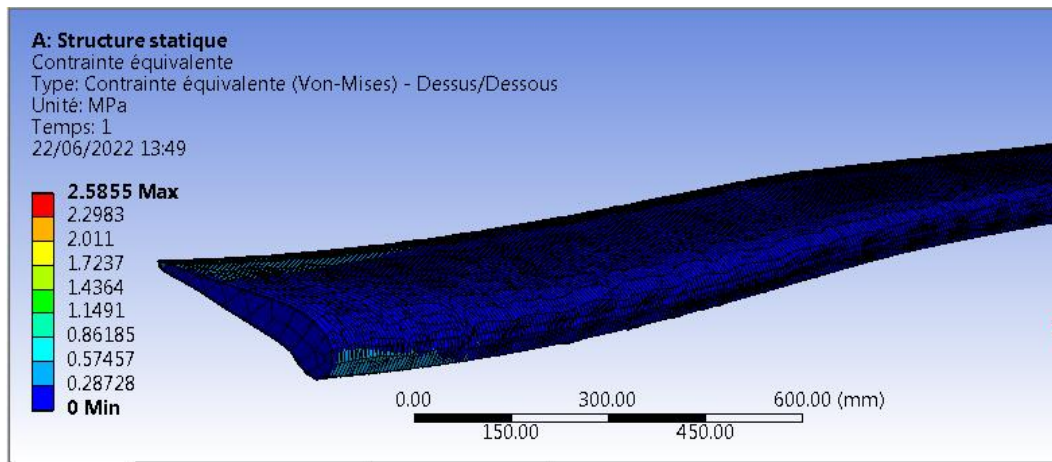


Fig. III. 12. Distribution du champs de contraintes sur la pale.

La figure 3.6 montre que la contrainte maximale se situe bien au niveau de l'encastrement avec le pied .

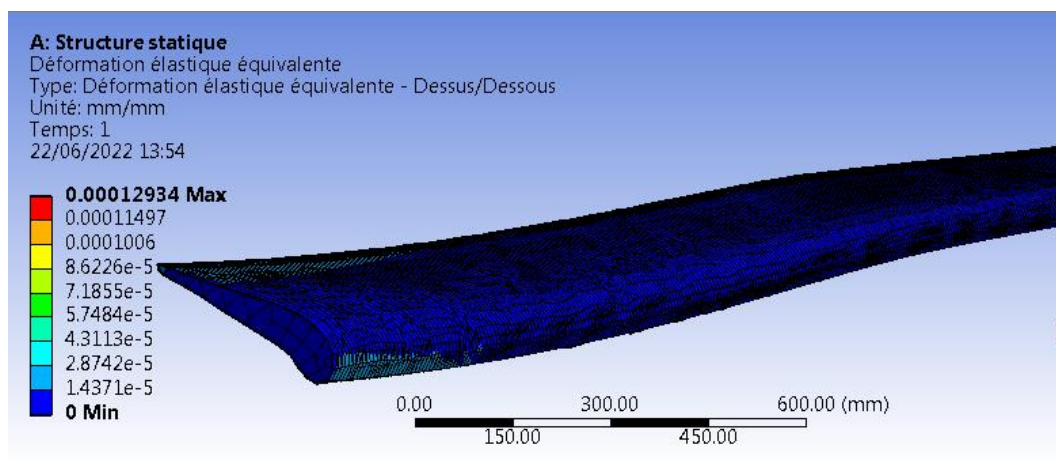


Fig. III.13. Distribution du champs de déformations sur la pale.

La figure 3.7 montre que la déformation maximale se situe bien au niveau de l'encastrement avec le pied. La déformation est liée à la contrainte par la loi de Hook généralisée. Ceci explique la ressemblance avec la figure 3.6.

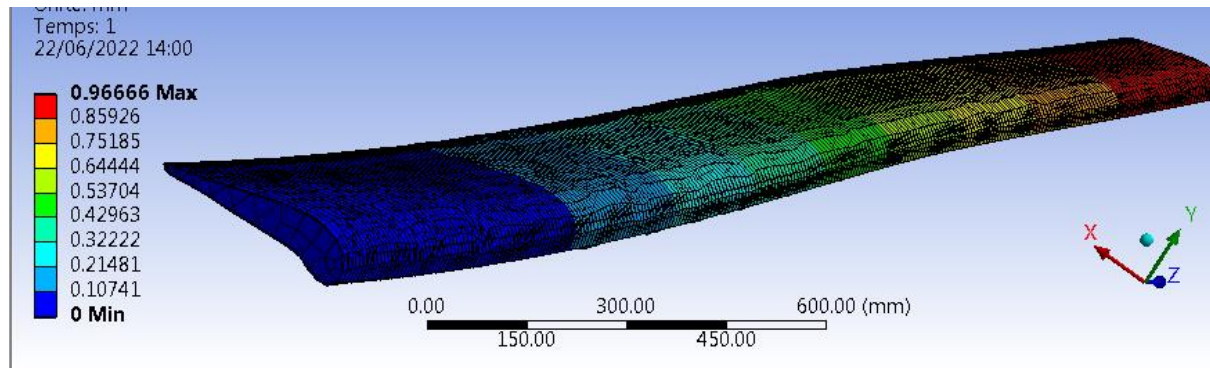


Fig. III.14. Distribution du champs de déplacement (flèche) de la pale.

La figure 3.8 montre que le déplacement maximale se situe bien au niveau de l'extrémité libre de la pale . Cette valeur représente bien la flèche qui est égale à 0.96 mm.

Tant que cette valeur ne dépasse pas le 1% de la longueur de la pale, qui est de $1\% \times 5250$ soit 52.5 mm, alors on ne fait aucun changement concernant le matériau ni les dimensions .

III.5.Conclusion

L'étude , la conception et la simulation du mat et de l'hélice et donc la pale d'une éolienne est tache qui nécessite des compétences diverses : Mécanique des fluides, aérodynamique, calcul des structures et encore la maitrise des logiciels spécialisés en conception assistée par ordinateur ainsi que les codes de calcul éléments finis et CFD .

C'est pour cela qu'on peut entamer l'étude de n'importe quelle éolienne en partant d'un cahier de charges qui représente les données de départ de type de projet.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons exposé un bon nombre d'étapes qui sont nécessaires pour concevoir et réaliser une éolienne pour produire de l'énergie électrique de 10 kilowatts suffisante à alimenter une maison . Afin d'être vulgariser, cette tâche doit être réalisable avec les moyens disponibles et à portée du maximum du public .

Bien que la but de ce travail est l'élargissement de la méthode de réalisation de l'éolienne domestique, alors que nous nous limitons sur les parties essentielles : Etude du mat et étude d'une pale et il reste beaucoup d'autres éléments à exposer tels que le multiplicateur de vitesse, la partie commande et bien d'autres .

Dans les chapitres 2 et 3 on a exposé la façon de démarrer le projet d'étude de conception et de réalisation d'une éolienne domestique (faible puissance). On estime en premier lieu l'énergie requise par la maison puis on détermine selon la loi de Betz, le diamètre du rotor et par conséquent la longueur de la pale et puis on commence la conception de la pale en choisissant un profil bien déterminé et fait la simulation de la pale pour s'assurer de sa résistance et normalement des vibrations, une fois terminé, on commence la conception du mat qui doit supporter le poids du rotor, du multiplicateur de vitesse, du générateur de courant et des autres accessoires sans oublier l'action du vent latéral . Tous ces conception et simulation nécessitaient l'utilisation de quelques logiciels, citons :le modeleur des solides CATIA et le CODE ANSYS.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Claës DYRBYE & Svend O. HANSEN: “Wind Loads on Structures” (1999)
- [2] John F.DOUGLAS/ Janusz M.GASIOREK/ John A. SWAFFIELD/ Lynne B.JACK: “FLUID MECHANICS Fifth Edition” (2005)
- [3] O.de VRIES “Fluid Dynamic Aspects of Energy Conversion” (1979)
- [4] Christian BAK: “Research in Aero elasticity EFP-2006” RISØ National Laboratory Technical University of Denmark
- [5] WIKIPEDIA – Internet website
- [6] Marc LEFRANC: Response of a Line-Like Structure to wind excitation. Probabilistic Method. (1993)
- [7] Recommended Practice DNV-RP-C205: “Environmental Conditions and Environmental Loads” (April 2007)
- [8] Recommended Practice DNV-RP-C203: ”Fatigue Design of OFFSHORE Steel Structure” (August 2005)
- [9] A.G DAVENPORT: “The Buffeting of Large Superficial Structures by atmospheric Turbulences” (1965)
- [10] D.C POWELL & J.R CONNELL: “Review of Wind Simulation – Methods For Horizontal Axis – Wind Turbine Analysis” (June 1986)
- [11] NORSOK Standard N-004 Rev. 2 October 2004: “Design of Steel Structure”
- [12] Kocer, Fatma Y. et Arora, Jasbir S. 1996. Conception de Poteaux de transmission en béton précontraint : optimisation Approcher. Journal of Structural Engineering 122, no. 7 (juillet): 804-814.
- [13] Manuel de données de conception des machines K. Lingaiah, Volume 33 McGraw-Hill School Education Group, l'Université de Michigan
- [14] James M.Gere Mécanique des matériaux Sixième édition Thomson Centre de ressources académiques d'apprentissage
- [15] Kocer, Fatma Y. et Arora, Jasbir S. 1999. Conception optimale de poteaux de transmission à cadre en H pour la charge sismique. Journal of Structural Engineering 125, no. 11 (février):1299-1308.

- [16] Negm, Hani M. et Maalawi, Karam Y. 1999. Optimisation de la conception des tours d'éoliennes. *Des ordinateurs et Structures* 74 (2000): 649-666
- [17] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. et Bossanyi, E. 2001. *Manuel de l'énergie éolienne*. West Sussex, Angleterre : John Wiley & Sons Ltd.
- Das, Braja M. 2007. *Principes de fondation Ingénierie*. 6e éd. New Delhi : Apprentissage Cengage.
- [18] Kocer, Fatma Y. et Arora, Jasbir S. 2002. Conception optimale de pylônes en treillis soumis à une charge sismique. *Journal of Structural Engineering* 128, no. 2 (février): 197204.
- [19] Ugural, Ansel C. et Saul K. Fenster. 2003. *Avancé Résistance et élasticité appliquée*. 4e éd. New Jersey: Prentice Hall.
- [20] Arora, Jasbir S. 2004. *Introduction à la conception optimale*. 2^{ème} Éd. Boston : Elsevier.
- Brown, Robert Wade. 2001. *Pratique Manuel d'ingénierie des fondations*. 2e éd. New York: McGraw-Hill.