

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département de Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Thème

*Analyse structurelle d'une éolienne commerciale de 850 KW
destinée à opérer dans un climat saharien*

Dirigé par:

Mr: L.RIACHE Enseignant à l'ENP

Mr: A.SMAILI Professeur à l'ENP

Réalisé par :

MEZI Mabrouk

Promotion 2012

REMERCIEMENTS

Je remercie DIEU tout puissant qui m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Mes sincères remerciements à mes promoteurs Mr A.SMAILI et Mr L.RIACHE, pour m'avoir conseillé, dirigé pendant la réalisation de ce travail.

Par la même occasion, je remercie vivement Monsieur M.bouaziz qui a participé au bon déroulement de mon projet de fin d'étude par son soutien et conseil en particulier.

Je remercie Mr Ben-braïka et Mr belhadef membres du jury qui ont accepté d'examiner mon travail.

Mes remerciements vont également aux tous les enseignants qui ont participé à notre formation et l'aide qu'ils nous ont fourni pendant la période d'étude.

Je tiens également à ne pas oublier tous mes amis et mes camarades de la promotion, et tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la bonne réalisation de ce travail.

Je dédie ce modeste travail

A mon père et ma mère;

A mes frères et mes sœurs;

A toute la famille;

A tous mes amis;

Et tout qui j'ai connus durant ma formation

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تحليل هيكلية لتوربينات رياح ذات محور أفقي بالاستعانة بالبرنامج الحاسوبي سوليد ووركس. يتم إنجاز العمل وفق أربعة مراحل أساسية. الأولى تتمثل في جمع معلومات حول مختلف الطاقات المتجددة والتقنيات الانجازات السابقة لتربينات الرياح. المرحلة الثانية هي دراسة خصائص و إيروديناميكية لتوربينات رياح من خلالها إيجاد قوة الرياح التي تخضع لها، العزم وسرعة الدوران. المرحلة الثالثة تتمثل في دراسة ميكانيكية للأجزاء المكونة لتوربينات. في المرحلة الأخيرة هي المحاكاة بالبرنامج الحاسوبي سوليد ووركس

كلمات مفتاحية

تحليل هيكلية , توربينات رياح , إيروديناميكية , دراسة ميكانيكية , المحاكاة

Résumé

Ce travail consiste à analyser la structure d'une éolienne à axe horizontal à l'aide du logiciel solidworks, il est élaboré en quatre étapes principales. La première consiste à rassembler des informations sur les énergies renouvelables puis on s'est focalisé sur l'énergie éolienne et ses différentes technologies. La seconde porte sur l'étude des caractéristiques et l'aérodynamique de l'éolienne, qui nous ont permis de déterminer les forces qui s'exercent sur la structure ; le couple et la vitesse de rotation. La troisième est une étude mécanique des organes constitutifs de la turbine éolienne. La dernière est la simulation des contraintes déplacements par le logiciel solidworks.

Mots clés :

Analyse structurelle, éolienne, aérodynamique, études mécanique, simulation.

Abstract

The purpose of this work is the analysis of the structural horizontal axis wind turbine, using solid-works software. The analysis is done in four main steps. The first one consists in gathering information on various wind technologies. The second is the study of the wind turbine characteristics and the aerodynamics, in order to determine the applied forces, and the produced torque and rotating speed. The third step is the mechanical study of the wind turbine components. And the last one is the simulation of the models using the calculated parameters with solidworks.

Keywords

Analysis of the structural, wind turbine, aerodynamic, mechanical study, simulation.

SOMMAIRE

INTRODUCTIN GENERALE	1
-----------------------------------	---

CHAPITRE I: GENERALITE

I.1	Introduction :	4
I.2	Les principales sources d'énergies renouvelables	4
I.2.1	Génération de la chaleur	4
I.2.1.1	Thermo solaire	5
I.2.1.2	Géothermie	6
I.2.1.3	Biomasse	7
I.2.1.4	Thermique	8
I.2.2	Génération d'électricité	9
I.2.2.1	Hydraulique	10
I.2.2.2	Energie de la mer	10
I.2.2.3	Photovoltaïque	11
I.2.2.4	Production éolienne	11
I.3	Quelque notions sur le vent	13
I.3.1	Formation des vents :	13
I.3.2	Force de Coriolis :	14
I.3.3	Les différents vents :	14
I.3.3.1	Les vents dominants :	14
I.3.3.2	Cyclones et anticyclones :	14
I.3.3.3	Vents locaux :	15
I.3.4	Vents en Algérie :	15
I.4	Les différentes types d'éoliennes :	16
I.4.1	Eoliennes à axe vertical :	18
I.4.1.1	Rotor savonius :	18
I.4.1.2	Rotor Darrieus :	18
I.4.2	Eolienne à axe horizontal :	20
I.4.2.1	Eolienne face au vent « upwind » :	20

I.4.2.2	Eolienne sous le vent « downwind » :	21
I.5	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	21
I.5.1	Les avantages :	21
I.5.2	Les inconvénients :	22
I.6	Conclusion :	23

CAPITRE II : CARACTERISTIQUES STRUCTURELLES ET AERODYNAMIQUE DE L'EOLIENNE

II	Le fonctionnement de l'éolienne :	25
II.1	Les éléments consistent les éoliennes :	25
II.1.1	Description de la nacelle :	26
II.1.2	Rotor :	27
II.1.3	Tour et fondations :	28
II.2	Matériaux :	28
II.3	Les caractéristiques des poids généraux :	29
II.4	Aérodynamique de l'éolienne :	29
II.4.1	Théorie de batz :	30
II.4.2	Facteur d'induction axiale :	31
II.4.3	Coefficients de puissance et de poussée :	32
II.4.4	Limite de batz :	33
II.4.5	La courbe de puissance électrique de l'éolienne :	34
II.4.6	La courbe de CP et CT:	35
II.4.7	Caractéristique du capteur d'éolienne :	35
II.4.5.1	Paramètre de vitesse :	35
II.4.5.2	Coefficient de couple et le couple aérodynamique :	36
II.5	Conclusion :	36

CHAPITRE III : ETUDE MECANIQUE

III	Schéma cinématique :	38
III.1	Rappelle sur les résistances des matériaux :	38
III.2	Les pales :	39
III.3	L'arbre principal :	41
III.4	Multiplicateur :	42
III.5	La tour :	44

III.6	Les accouplements :	45
III.7	Calcul des freins:	46
III.8	Etudes de la clavette:	46
III.9	Calcul des roulements:	48
III.10	La génératrice:	49
III.11	Conclusion :	51

CAPITRE IV : RESULTATS PAR LA SIMULATION SOLIDWORKS.

IV	Calcul aérodynamique :	53
IV	Les pales :	55
IV.1.1	Les pales en rotation :	55
IV.1.2	Les pales dans le cas statique :	60
IV.2	L'arbre principal :	62
IV.3	La tour.....	66
IV.4	Multiplicateur.....	71
V	Bibliographie:	81
VI	Annexe.....	83

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Panneaux solaires	6
Figure I.2: Géothermie haute énergi.....	7
Figure I.3: Centrale de la biomasse	8
Figure I.4: La génération d'électricité éolienne	9
Figure I.5: Centrale hydroélectrique.....	10
Figure I.6: Parc éolienne.....	12
Figure I.7: Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW.....	13
Figure I.8: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).....	16
Figure I.9: Types des éoliennes.....	17
Figure I.10: Effet du vent sur un corps creux.....	19
Figure I.11: Principe de l'incidence variable.....	19
Figure II.1: Schéma d'une éolienne de 850 KW.....	25
Figure II.2: Modélisation du rotor éolien par un disque actuateur	31
Figure II.3: Paramètres opératoires d'une turbine Betz	34
Figure II.4: La courbe de puissance électrique.....	34
Figure II.5: Courbe de CP et CT	35
Figure III.1: Schéma cinématique de l'éolienne à axe horizontal	38
Figure III.2: Modélisation du chargement sur la pale.....	40
Figure III.3: Chargement de l'arbre.....	41
Figure III.4: Schématisation du chargement d'arbre.....	41
Figure III.5: Schéma cinématique de multiplicateur	42
Figure III.6: Passage d'une denture cylindrique à une poutre rectangulaire encastrée.....	43
Figure III.7: les charges de la tour.....	45
Figure III.8: Développement d'un accouplement Rotex sur DAO 3D	45
Figure III.9: Etrier de frein	46
Figure III.10 :Zone de contact garniture/frein.....	46
Figure III.11: Montage par clavette	47
Figure III.12: Diamètre interne du stator en fonction de la puissance conventionnelle.....	50
Figure IV.1: Dessin de la pale soumise aux forces des vents.....	55
Figure IV.2: Distribution des contraintes sur la pale.....	56
Figure IV.3: Distribution des déplacements sur la pale.....	56
Figure IV.4: Distribution des déformations sur la pale.....	57
Figure IV.:5 Histogramme des contraintes maximales sur la pale.....	58

Figure IV.6: Histogramme des résultats déplacements maximaux sur la pale.	59
Figure IV.7: Histogramme des déformations maximales sur la pale.	60
Figure IV.8: Distribution des contraintes sur la pale.....	61
Figure IV.9: Distribution des déplacements sur la pale.....	61
Figure IV.10: Distribution des contraintes sur la pale.....	62
Figure IV.11: Dessin de l'arbre principal avec les chargements.	63
Figure IV.12: Distribution des contraintes sur l'arbre principal.....	63
Figure IV.13: Distribution des déformations sur l'arbre principal.	64
Figure IV.14: Histogramme des contraintes maximales sur l'arbre principal.	65
Figure IV.15: histogramme des déformations maximales sur l'arbre principal.	66
Figure IV.16: Dessin de la tour avec chargements.....	67
Figure IV.17: Distribution des contraintes sur la tour.	67
Figure IV.18: Distribution des déplacements sur la tour.....	68
Figure IV.19: Distribution des déformations sur la tour.....	68
Figure IV.20: Histogramme des contraintes maximales sur la tour.	69
Figure IV.21: Histogramme des déplacements maximaux sur la tour.	70
Figure IV.22: Histogramme des déformations maximales sur la tour.....	71
Figure IV.23: Dessin de multiplicateur.	72
Figure IV.24: Distribution des contraintes sur le premier engrenage.	73
Figure IV.25: Distribution des déplacements sur le premier engrenage.	73
Figure IV.26: Distribution des déformations sur le premier engrenage.	74
Figure IV.27: Distribution des contraintes sur le deuxième engrenage.	75
Figure IV.28: Distribution des déplacements sur le deuxième engrenage.	75
Figure IV.29: Distribution des déformations sur le deuxième engrenage.	76
Figure IV.30: Distribution des contraintes sur l'arbre de transmission.....	77
Figure IV.31: Distribution des déformations sur l'arbre de transmission.	77

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1: Classification des turbines éoliennes.	16
Tableau II.2: Caractéristiques généraux.	30
Tableau II.3: Le nombre de pale en fonction de la vitesse spécifique	36
Tableau III.1: Valeur du coefficient de températures	45
Tableau III.2:Diamètre extérieur du stator en fonction du nombre de pôles.	50
Tableau IV.1: Résultats de calculs des puissances.....	55
Tableau IV.2: Résultats des contraintes maximales sur la pale en (KN/m ²).....	57
Tableau IV.3: Résultats des déplacements maximaux sur la pale en (mm).	58
Tableau IV.4: Résultats des déformations maximales sur la pale en (10 ⁻⁴ mm).....	59
Tableau IV.5: Résultats sur la pale avec une vitesse du vent 30 m/s.	62
Tableau IV.6:Résultats des contraintes maximales sur l'arbre principal en (KN/m ²).....	64
Tableau IV.7: Résultats des déformations maximales sur l'arbre principal en (10 ⁻⁴ mm).....	65
Tableau IV.8: Résultats des contraintes maximales sur la tour en (KN/m ²)	69
Tableau IV.9: Résultats des déplacements maximaux sur la tour en (mm).....	70
Tableau IV.10: Résultats des déformations maximales sur la tour en (10 ⁻⁵ mm).	70
Tableau IV.11: Résultats des contraintes maximales sur le premier engrenage en (KN/m ²). .	74
Tableau IV.12: Résultats des déplacements maximaux sur le premier engrenage en (mm). ...	74
Tableau IV.13: Résultats des déplacements maximaux sur le premier engrenage (10 ⁻⁴ mm). 74	74
Tableau IV.14: Résultats des contraintes maximales sur le deuxième engrenage (KN/m ²). ...	76
Tableau IV.15: Résultats des déplacements maximaux sur le deuxième engrenage en (mm). 76	76
Tableau IV.16:Résultats des déformations maximales sur le deuxième engrenage	76
Tableau IV.17:Résultats des contraintes maximales sur l'arbre de transmission	78
Tableau IV.18:Résultats des déformations maximales sur arbre de transmission	78

NOMENCLATURE

Symbole	Unité	Signification
P	[kW]	Puissance
U	[m/s]	Vitesse
F_V	[KN]	La force du vent
D	[m]	Diamètre
A	[m ²]	section du disque rotor
E	[m]	Epaisseur
M	[N.m]	Moment
R	[m]	Rayon
S	[m ²]	Air d'une section
P	[Pa]	Pression
I	[mm ⁴]	Moment quadratique
A	sans unité	Facteur d'induction axiale
T	[N]	Poussée
C_p	sans unité	Coefficient de puissance
C_T	sans unité	Coefficient de poussée
F_c	[N]	Force centrifuge
C_s	sans unité	Coefficient de sécurité
ρ	[kg/m ³]	Masse volumique
ω	[rad/s]	Vitesse angulaire
C_a	[N.m]	Le couple aérodynamique
C	[N.m]	Le couple utile
σ_e	[GPa]	Limite élastique
N	[tr/min]	Vitesse de rotation d
P	[N]	Poids
E	[N/m ²]	Module de yong
Y	sans unité	Coefficients de poisson
G	[N/m ²]	module de glissement
γ	[°]	Angle de glissement
R_p	[MPa]	Résistance élastique
I_z/v	[mm ³]	Module de flexion de la section de la poutre
T_{KN}	[N/m ²]	Le couple nominal
μ	sans unité	Coefficient de frottement
L_{10h}	[h]	La durée de vie nominale
P'	[kW]	La puissance conventionnelle
η_m	S U	Rendement mécanique
θ	[°]	Angle
D_i	[m]	Diameter interieur
P_n	[kg]	poids
h	[m]	hauteur

Symbole	Unité	Signification
σ_{eq}	[GPa]	Contrainte équivalente
m	sans unité	Module
S_0	sans unité	coefficient de sécurité
η_S	sans unité	La vitesse de rotation
M_f	[N.m]	Moment de flexion
$M_{/0}$	[N.m]	moment
F	[KN]	la force
c_q	sans unité	Coefficient de couple
e	[m]	épaisseur
l	[m]	Longueur

Indice	signification
a	Air
c	Centrifuge
f	Flexion
M	Maximale
n	Nominale
p	Poussée
r	Résistant

Lettres grecs	unité	signification
α	[°]	Angle d'attaque
β	[°]	Angle décalage
λ	Sans unité	Vitesse spécifique
σ	[N/mm ²]	Contrainte
τ	[N/mm ²]	Contrainte de cisaillement

INTRODUCION GÉNÉRALE

Ces dernières années, l'énergie éolienne s'est considérablement développée, générant une croissance significative de la puissance installée dans le monde (de l'ordre de 30 à 40% en rythme annuel). Cette tendance est poussée, d'une part, par la limitation et l'épuisement progressif des ressources fossiles (hydrocarbures, charbon...) et fissiles (uranium) et d'autre part aux émissions de gaz à effet de serre provoquées par les hydrocarbures, ceci sans parler de la production de déchets radioactifs difficiles à traiter dans le cas du nucléaire.

Face à ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,...

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, l'Amérique du nord 6677 MW, l'Espagne 6202 MW, le Danemark 3110 MW, et la Hollande 912 MW. Par contre en Afrique, le développement de l'énergie éolienne n'a connu aucune évolution et pourtant les ressources n'y manquent pas et la technologie accessible, sauf la volonté et le manque de prise de conscience de la majorité des autorités africaines. C'est dans le cadre de la sensibilisation et la contribution à la protection de l'environnement, que nous avons pensé à élaborer un document qui peut servir de base et de guide pour analyser une éolienne qui destinée à opérer dans un climat saharien.

Dans le premier chapitre, nous exposerons des généralités sur les énergies renouvelables, le vent, et un aperçu historique ainsi que l'état de l'art des différentes technologies et leurs évolutions. L'état de l'art consiste à présenter les différents types d'éoliennes; préciser les caractéristiques de chacun des types pour enfin connaître les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.

Dans le second chapitre, nous donnons toutes les caractéristiques et fonctionnements de chaque élément de notre éolienne; Nous ferons un rappel des principales théories dont nous aurons besoin lors de l'analyse de la structure. Nous utilisons les caractéristiques

aérodynamiques de la géométrie du profil, pour calculer les forces agissant sur ces dernières. Nous appliquerons aussi la théorie de Betz qui nous permettra d'avoir une approximation de l'énergie maximale récupérable de l'énergie cinétique du vent.

Dans le troisième chapitre, nous appliquerons les lois de résistance des matériaux (RDM) pour les organes mécaniques, ces lois consistent en un calcul analytique approché .

Dans le dernier chapitre, nous aborderons la simulation solidworks des éléments principaux de l'éolienne, avec des différentes vitesses du vent et différents matériaux, Les résultats obtenus nous permettront de conclure et valider nos modèles et d'envisager les perspectives.

CHAPITRE I :

GÉNÉRALITÉS

I.1 Introduction

Les sources renouvelables d'énergie, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance, la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou installations isolées.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

I.2 Les principales sources d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie, ..).

I.2.1 Génération de la chaleur

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole [1].

Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables:

I.2.1.1 Thermo solaire

Le solaire thermique utilise le soleil tout comme le photovoltaïque mais de façon différente, puisqu'il récupère de la chaleur qu'il transmet ensuite à un circuit d'eau qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage [2].

Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C [1].

Cette énergie représente un rendement élevé et permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement. La marge de manœuvre, en matière de substitution aux énergies fossiles, est très importante : s'il est certes impossible de se chauffer uniquement par le soleil (la chaleur ne se stocke pas sur de longues périodes), il serait toutefois possible de produire 50% de l'énergie de chauffage dont nous avons besoin [2].

Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs sont élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation on locale (principalement chauffage individuel, piscines). Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement.

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent. En 2003 environ 14000 m² de capteurs de ce type ont été en utilisation en Union Européenne avec une croissance annuelle de 22% [1].



Figure I.1: Panneaux solaires.

I.2.1.2 Géothermie

La géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais des processus de désintégration à l'intérieur de la croûte terrestre. A part cela il existe également la géothermie volcanique.

En général, l'énergie géothermique est exploitée en pompant en utilisant des puits de forage de l'eau chaude provenant d'une zone du sous-sol poreuse imprégnée d'eau très chaude. La chaleur produite sert dans la plupart des cas à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage de bâtiments. Au cas de températures au-dessus de 150°C la production d'électricité est possible, la puissance installée était de 8 GW électriques en 1998 pour le monde entier [3].

La température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3°C par 100 m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étage de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol soit poreux ou perméables et contiennent des aquifères.

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement [1]:

- la haute (>180°C).
- moyenne (>100°C).
- basse (>30°C).
- très basse énergie (<30°C).

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques et elle représente comme une source d'énergie constante de forte puissance. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Elle s'apparente davantage à une ressource minière, par la réalisation de ses forages profonds, par les lourds investissements qui la caractérisent et par son exploitation qui consiste à extraire les calories du noyau terrestre et par le fait qu'elle est épuisable. Et par contre la géothermie est limitée au nombre de site.



Figure I.2: Géothermie haute énergie.

I.2.1.3 Biomasse

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

L'énergie peut être stockée et émet peu de gaz à effet de serre. Cependant, la biomasse ne peut avoir qu'un apport limité, en raison de ses impacts négatifs sur l'environnement.

L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le

bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir [1].



Figure I.3: Centrale biomasse.

I.2.1.4 Thermique

La centrale thermique produit l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique obtenue en brûlant un combustible tel que charbon, gaz ou fuel. Son cycle de fonctionnement comporte trois phases :

- La transformation de l'énergie chimique du combustible en énergie de la vapeur dans la chaudière.
- La transformation de l'énergie de la vapeur en énergie mécanique dans la turbine.
- La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique dans l'alternateur.

Suivant la forme de l'énergie produite, les centrales thermiques sont classées en 2 catégories :

Centrales à turbines à vapeur à condensations et les centrales à turbines à prélèvement dites aussi à turbines contre pression qui sont destinées à la production simultanée d'énergie thermique et d'énergie électrique (chauffage urbain, alimentation en eau chaude).

Ces dernières sont construites au voisinage de grandes villes et sont plus économiques que les centrales à condensation [4].

I.2.2 Génération d'électricité

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique.

Selon l'article de [3], la production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part de l'énergie renouvelable n'est que de 14% environ en 1998.

Le plus fort taux de croissance actuel (Environ 30% par an en moyenne depuis plus de 10 ans). A la fin de 2002, La génération d'électricité éolienne est environ de 30,5 GW mondiaux (1% de la puissance totale), 22 GW en Europe et 12 GW en allemands.

En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une production d'électricité éolienne de 140 GW mondiaux et 90 GW en Europe [5].

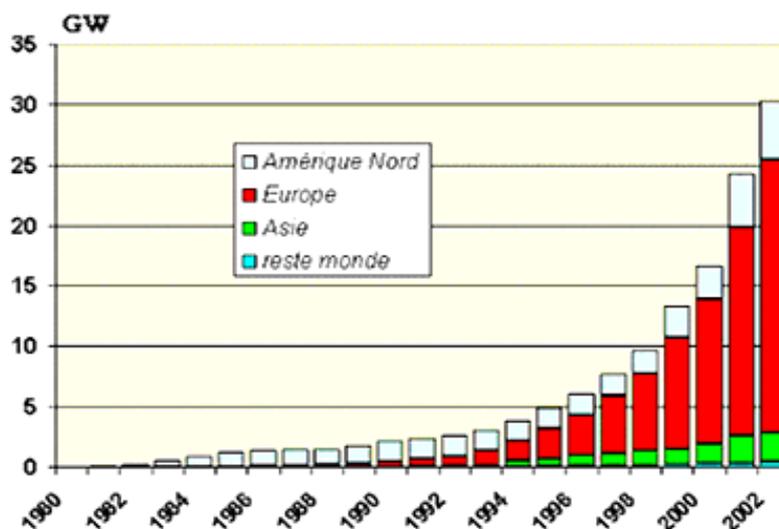


Figure I.4: La génération d'électricité éolienne

I.2.2.1 Hydraulique

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. L'énergie hydraulique est produite soit au fil de l'eau soit par le biais du stockage de l'eau (lac de barrage, retenues d'eau) qui permet la constitution d'un stock d'énergie électrique mobilisable à tout moment. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et stockable [1].

Son principal avantage est de fournir de fortes puissances et de stocker l'énergie dans les retenues d'eau. Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique. En Europe, en 1999, on comptait environ 10 GW de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13 GW [6]



Figure I.5: Centrale hydroélectrique.

I.2.2.2 Energie de la mer

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter

dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [1].

I.2.2.3 Photovoltaïque

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standards fournissent une puissance moyenne de 100 W par m² (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries. L'énergie solaire photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production [2].

L'avantage des cellules photovoltaïques réside dans la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, et dans leur souplesse d'utilisation qui les rend utilisable notamment dans les pays en voie de développement qui ne dispose pas de réseau électrique important. Cependant, leur rendement reste faible [4].

Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT) [1].

I.2.2.4 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. L'énergie récupérée est fonction de la vitesse du vent et de la surface mise face au vent. L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles : la production d'électricité et le pompage éolien.

La production d'électricité (aérogénérateur): Ces systèmes demandent une bonne technicité. Si l'on excepte l'Inde et la Chine, peu de pays en développement en fabriquent. Les projets exigent des sites ventés et des niveaux d'investissement élevés. Les puissances

obtenues demeurent encore à l'heure actuelle des projets pilotes, sauf au Maroc ou en Mauritanie, car ces applications sont variables selon la vitesse du vent et la taille des pales.

Le pompage éolien : Les pompes éoliennes sont d'une puissance généralement inférieure à 10 KW. C'est une technologie ancienne avec de nombreuses variantes à travers le monde. Elle demande des vents de 3 à 4 mètres par seconde au minimum [2].



Figure I.6: Parc éolienne.

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. L'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27 GW pour 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde.

En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70 GW. Parmi les avantages de la production éolienne, le Coût de fonctionnement est relativement faible [1].

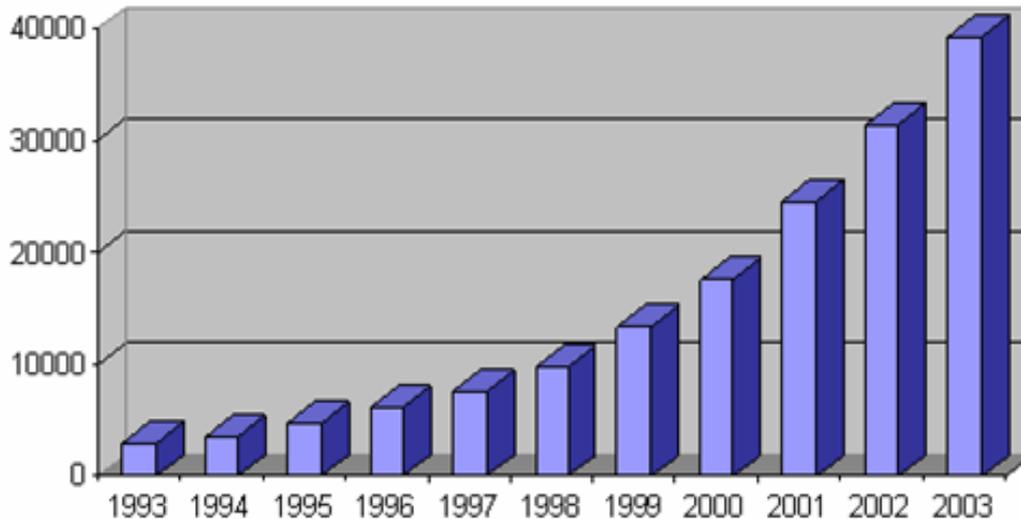


Figure I.7: Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW.

I.3 Quelques notions sur le vent

I.3.1 Formation des vents

Les vents sont produits par les différences de pression atmosphérique engendrées principalement par les différences de température de l'air. Les variations dans la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire reçue à la surface de la Terre, ainsi qu'aux différences dans les propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'élever et à s'écouler par-dessus l'air le plus froid et le plus lourd. La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la Terre.

I.3.2 Force de Coriolis

La force de Coriolis s'exerce sur tout corps en mouvement à la surface terrestre, et produite par l'accélération complémentaire due à la rotation de notre planète.

Ce phénomène a été mis en évidence au XIX^e siècle par le mathématicien et ingénieur français Gaspard Coriolis. La force de Coriolis, bien que de faible intensité, joue un rôle prépondérant dans la direction des vents et des courants océaniques. Ceux-ci sont déviés vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. La force de Coriolis est nulle à l'équateur et maximale aux pôles, c'est une force centrifuge.

Contrairement à une idée reçue, la force de Coriolis n'est pas à l'origine du sens du tourbillon d'eau dans une baignoire (ou un lavabo) qui se vide. Elle est bien trop faible à cette échelle pour avoir un effet significatif. Le sens du tourbillon dépend en fait des conditions initiales de l'eau stagnante (l'eau n'étant jamais totalement au repos, elle a un sens de rotation privilégié qui va s'accroître lors de son écoulement dans le siphon).

I.3.3 Les différents vents

Il existe quatre types principaux de vents : les vents dominants, les vents cycloniques et anticycloniques, les vents saisonniers et les vents locaux.

I.3.3.1 Les vents dominants

Correspondent aux grandes tendances planétaires. Leur direction est très différente suivant la latitude où l'on se trouve sur le globe :

- près de l'équateur, l'air chaud monte et génère des vents verticaux. Il y a très peu de vent horizontal. Dans leur jargon maritime, les navigateurs appellent cette région de vents faibles et variables le « pot au noir », également appelée zone des calmes équatoriaux (ou zone de convergence intertropicale [ZCIT]) par les météorologues ;
- dans les régions tropicales, entre 10° et 30° de latitude dans les deux hémisphères, les vents dominants viennent de l'est. Ce sont les alizés ;
- aux moyennes latitudes (entre 30° et 60°), les vents dominants viennent de l'ouest. Ils entraînent avec eux les perturbations atmosphériques cycloniques (ou dépressions) qui apportent de la pluie ;
- dans les régions polaires, les vents viennent de l'est et ont tendance à instaurer une circulation anticyclonique.

I.3.3.2 Cyclones et anticyclones

La Terre connaît des vents cycloniques et anticycloniques. Les cyclones sont des zones de basses pressions (jusqu'à 970 hPa) avec des vents ascendants qui amènent de la pluie. À l'opposé, les anticyclones sont des zones de hautes pressions (jusqu'à 1 040 hPa) avec des vents descendants qui amènent du beau temps. Le climat de la France métropolitaine est par exemple conditionné par les positions de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande.

Ces systèmes de vents font plusieurs kilomètres de diamètre. La force de Coriolis, liée à la rotation de la Terre, tend à dévier ces vents vers la droite dans l'hémisphère Nord (inversement dans l'hémisphère Sud). Dans l'hémisphère Nord, les vents anticycloniques tournent alors dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis que les vents d'origine cyclonique tournent dans le sens inverse (et inversement dans l'hémisphère Sud)[14].

I.3.3 Vents locaux

De la même façon qu'il existe des variations saisonnières de température et de pression au-dessus des continents et des océans, on observe des changements quotidiens qui ont des effets similaires, mais plus localisés. En été, en particulier, la terre est plus chaude que la mer dans la journée, et plus froide la nuit. Les variations de pression ainsi provoquées génèrent un système de brises dirigées vers la terre pendant la journée (brise de mer) et vers la mer pendant la nuit (brises de terre). Ces brises de mer et de terre font subir leur influence jusqu'à environ 50 km des côtes. Le même phénomène se produit en montagne et engendre les brises de montagne et de vallée.

I.3.4 Vents en Algérie

La carte représentée en figure 8 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, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa 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 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 telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année.

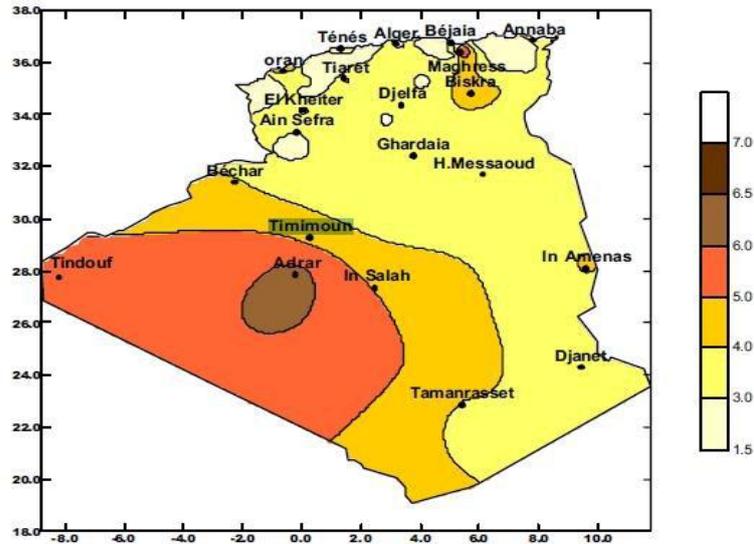


Figure I.8: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

I.4 Les différentes types d'éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau suivant présente une classification des turbines éoliennes.

Tableau I.1: Classification des turbines éoliennes

ECHALLE	DIMETRE DE L'HELICE	PUISSANCE DELIVREE
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1MW et plus

❖ Les raisons pour choisir une grande éolienne

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.

2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

❖ **Les raisons pour choisir une éolienne plus petite**

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.

2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.

4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36KW)[8] .



Figure I.9:Types des éoliennes.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles

Celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

I.4.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [13].

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

- Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent

I.4.1.1 Rotor savonius

Cette machine a été inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1929. Elle comporte essentiellement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport l'autre. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (figure1.4). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe [8].

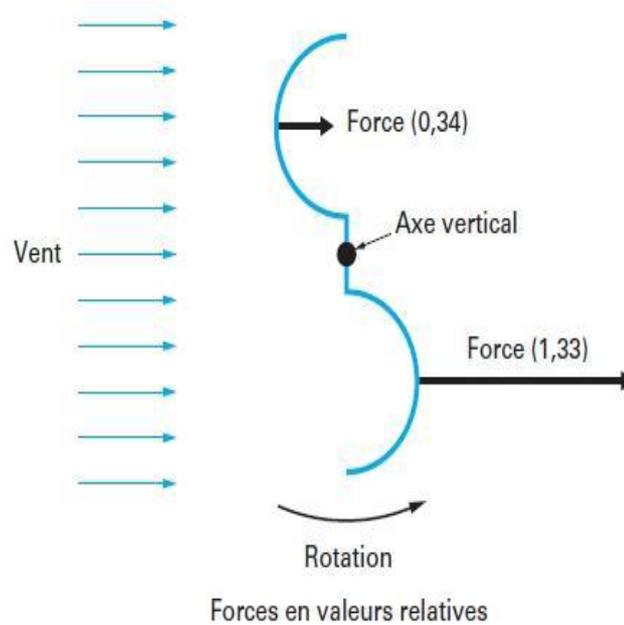


Figure I.10: Effet du vent sur un corps creux

I.4.1.2 Rotor Darrieus

Le principe repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif, la combinaison de ces forces génère alors un couple moteur Figure (1.6). Darrieus, durant les années 1930 a breveté son invention qui repose sur ce principe. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique...etc [8].

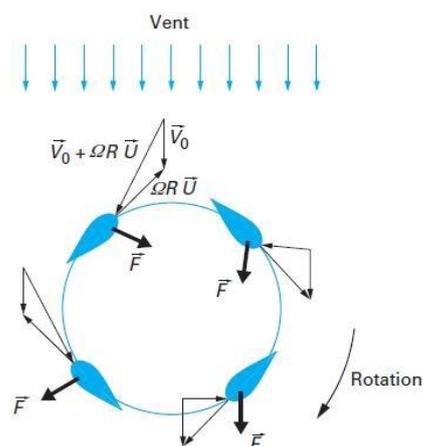


Figure I.11: Principe de l'incidence variable.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.

- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).

I.4.2 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontal.

Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW.

Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [13].

I.4.2.1 Eolienne face au vent

L'écoulement de vent attaque le rotor par la face. Le principal avantage de cette configuration est qu'elle permet d'éviter l'effet d'ombrage (nuance) derrière la tour qui est très important comparé au même effet avant la tour. En effet l'écoulement commence à se plier loin avant d'attaquer la tour, ce qui provoque un léger effet de nuance. Notons qu'à chaque fois que l'une des pales du rotor coïncide avec la tour la puissance subit une perturbation qui entraîne une diminution du rendement de l'éolienne.

I.4.2.2 Eolienne sous le vent

L'écoulement du vent est d'incidence derrière le rotor. Le principale avantage de cette configuration est la possibilité de suivre la direction du vent sans nécessité de mécanisme annexes à condition que le rotor et la nacelle aient été conçu de sorte à permettre cette opération. Cet avantage permet une construction plus flexible des pales du rotor du fait de la mobilité de la nacelle. La flexibilité du rotor permet, aux grandes vitesses, d'absorber une partie des charges sur la nacelle et ce en se pliant tout en restant dans la limite d'élasticité du matériau. La rotation de la nacelle pour suivre le vent n'est pas sans danger. Le risque se situe au niveau du câble électrique qui, avec la rotation de la nacelle, subit une torsion. Au-delà d'un certain nombre de tours le câble sera cisailé ce qui est très dangereux d'où nécessité d'un compteur de tours et d'un mécanisme qui permet le redressement de la nacelle. L'inconvénient majeur est le passage du rotor dans une zone d'ombrage qui provoque des fluctuations de la puissance et une fatigue des organes mécaniques.

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.5.1 Les avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [7].
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.[9]
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable.
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [9].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [3].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, selon l'article le coût de l'éolienne a diminué presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

I.5.2 Les inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une

distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien. Selon l'article de [3], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.6 Conclusion

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables. Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

CHAPITRE II

CARACTÉRISTIQUES STRUCTURELLES ET AÉRODYNAMIQUE DE L'ÉOLIENNE

Les éoliennes représentent une part importante de la production d'énergie renouvelable. Suite à la crise pétrolière européenne des années 70, le développement et la commercialisation des turbines éoliennes ont été fortement encouragés. Depuis lors, l'exploitation des ressources éoliennes est de plus en plus performante et l'industrie éolienne a connu un essor considérable lors de la dernière décennie. Les turbines éoliennes sont de plus en plus puissantes, les rendements et la disponibilité augmentent et les parcs éoliens sont de plus en plus grands.

II Le fonctionnement de l'éolienne

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité

II.1 Les éléments consistent les éoliennes

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Dans nos études, on intéressent à des éoliennes à axe horizontal :

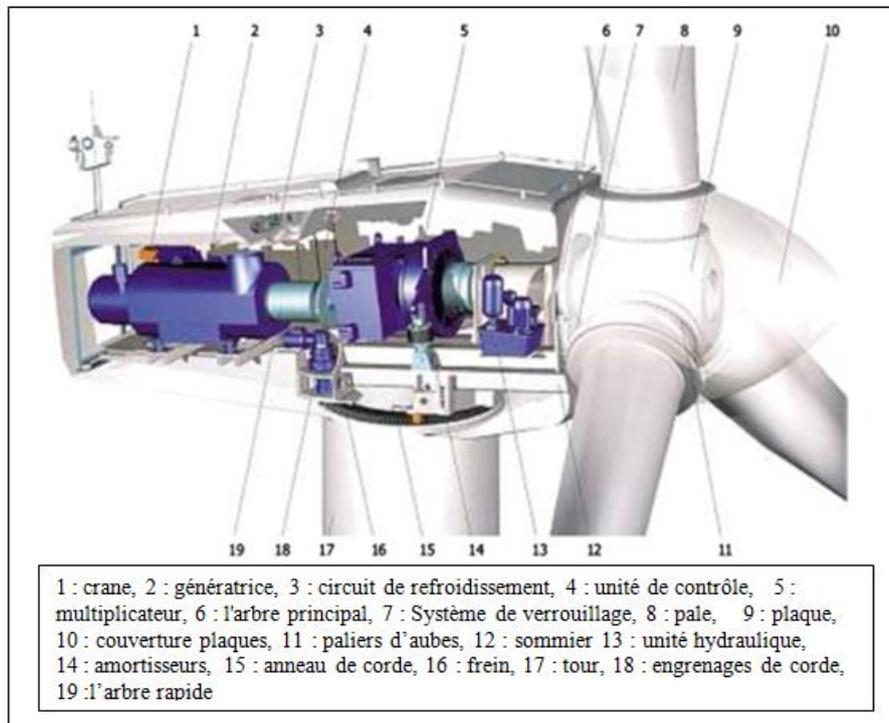


Figure II.1: schéma d'une éolienne de 850 KW [14].

II.1.1 Description de la nacelle [14]

- **Carénage :**

Le carénage est l'enveloppe qui protège les composants de l'aérogénérateur qui se trouvent dans la nacelle face aux agents météorologiques et aux conditions environnementales externes. Il est composé d'une pièce inférieure, de deux latérales planes, d'une pièce arrière et d'une toiture. Son matériau est un polymère synthétique renforcé par de la fibre de verre.

Il y a suffisamment d'espace à l'intérieur du carénage pour réaliser des opérations de réparation et de maintenance de l'aérogénérateur.

- **Châssis :**

Le châssis a été conçu conformément à des critères de simplicité mécanique et de robustesse prévue pour supporter les éléments de la nacelle et transmettre les charges jusqu'à la tour. La transmission de ces charges est réalisée par l'intermédiaire du système de rotation.

- **Arbre principal :**

Le couple moteur que produit le vent sur le rotor se transmet jusqu'au multiplicateur à travers l'arbre principal. L'arbre est raccordé au moyeu avec une bride vissée et il s'appuie sur deux roulements logés dans un support unique en fonte. La jonction avec l'entrée de basse vitesse du multiplicateur est obtenue par une bride conique de serrage qui transmet le couple par friction. L'arbre est fabriqué en acier et possède un orifice central longitudinal permettant de recevoir l'actionneur du système de changement de pas.

L'appui de l'arbre principal sur 2 roulements comporte des avantages importants puisqu'il évite qu'aucune charge, à l'exception du couple de torsion, ne soit transmise au multiplicateur, ce qui minimise l'apparition de problèmes sur ce composant. Le système facilite l'entretien en permettant de démonter le multiplicateur sans devoir démonter l'arbre principal.

- **Multiplicateur :**

Les rotors dont le diamètre très grands 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.

Le multiplicateur est composé de trois étages combinés. La denture du multiplicateur est conçue de manière à obtenir une efficacité maximale avec un niveau réduit d'émission de bruit. Du fait du rapport de multiplication, une partie du couple d'entrée est absorbée par les

bras de réaction. Ces bras de réaction fixent le multiplicateur au châssis avant par l'intermédiaire de suspensions qui minimisent la transmission de vibrations. L'arbre rapide est relié au générateur grâce à un accouplement flexible.

Grâce à la conception modulaire de la transmission, le poids du multiplicateur est supporté par l'arbre principal, tandis que les amortisseurs d'assemblage au châssis réagissent au couple de torsion en évitant la rotation du multiplicateur, ainsi que des charges non souhaitées.

Le multiplicateur a un système de lubrification principal avec un système de filtrage d'huile associé à l'arbre principal. Il existe un équipement secondaire électrique de filtrage permettant d'éliminer les impuretés dans l'huile.

- **Système d'orientation :**

Le système d'orientation permet la rotation de la nacelle autour de l'arbre de la tour. Grâce à l'action combinée du coussinet de friction et des freins des mâchoires, nous obtenons un couple de retenue suffisant pour contrôler la rotation d'orientation. L'action conjointe de ces systèmes évite la fatigue et d'éventuels dommages sur la couronne avec la girouette placée sur la toiture, il est possible d'analyser le changement de direction du vent. De cette manière, les motoréducteurs s'activent pour réorienter le rotor.

- **Système de freinage :**

Le frein primaire de l'aérogénérateur est aérodynamique par la mise en drapeau des pales. Le frein mécanique secondaire est un frein à disque, activé hydrauliquement et qui est monté à la sortie de l'arbre rapide du multiplicateur. Son utilité principale est d'appliquer le frein de stationnement empêchant le démarrage de la rotation une fois à l'arrêt.

- **Système hydraulique :**

Le système hydraulique fournit le débit d'huile à la pression nécessaire pour l'actionnement :

- Du système de changement de l'angle de pas de la pale.
- Du frein du système d'orientation
- Du frein mécanique de l'arbre rapide.

Nous disposons d'un système qui garantit le niveau de pression et le débit d'huile nécessaire en cas d'absence de courant pour activer le cylindre de pas des pales, le frein à disque et le frein du système d'orientation.

- **Générateur :**

Le générateur est de type asynchrone, avec 4 pôles, il est doublement alimenté avec un rotor bobiné et des bagues collectrices. Il est refroidi par convection forcée. L'air est évacué à l'extérieur par la conduite située dans le toit du carénage.

Le système de contrôle du générateur permet de travailler avec glissement variable afin de pouvoir produire de l'énergie en dessous de la vitesse de synchronisation et réduire les charges.

Le générateur est protégé contre les courts-circuits et les surcharges. La température est surveillée en permanence par l'intermédiaire de sondes installées en plusieurs points du stator et des roulements.

II.1.2 Rotor

Le rotor de l'aérogénérateur de la plate-forme est un rotor à trois pales raccordées à un moyeu sphérique par l'intermédiaire des roulements de pale. Le moyeu possède, au niveau des brides de raccord des pales, un angle de conicité de 3 °, éloignant la pointe des pales de la tour.

- **Pales :**

Les pales des aérogénérateurs de la plate-forme Gamesa G52-850 kW sont fabriquées dans un matériau constitué de matrice organique avec un renfort en fibre de verre.

Les pales, avec changement de pas sur l'envergure complète de la pale, sont conçues pour maximiser la production énergétique, réduire les charges avec la réduction conséquente de poids et réduire le bruit émis.

- ✓ La longueur des pales est de : 25,3m
- ✓ La vitesse de rotation en fonctionnement : 19.44 :30.8 tr /min

La distance de la base des pales jusqu'au centre du moyeu est de 0,7 m dans tous. La structure de chaque pale se compose de deux coques collées à une poutre principale de support. La pale est conçue pour remplir deux fonctions essentielles, une structurelle et une aérodynamique [14].

- **Moyeu :**

Le moyeu est en fonte. Il est vissé directement sur l'arbre principal. À l'intérieur se trouve le système de changement de pas. Il dispose d'une ouverture sur la partie frontale qui permet d'accéder à l'intérieur pour effectuer des inspections et la maintenance.

II.1.3 Tour et fondations

- **Tour :**

La tour de l'aérogénérateur est tubulaire en acier, de forme tronconique, formée de deux ou trois sections modulaires démontables, selon la hauteur totale. Elle inclut des plates-formes intérieures, un escalier d'accès intérieur et un éclairage de service d'urgence. Elle abrite à sa base le convertisseur/contrôleur.

- **Fondations :**

Les fondations standard sont de type dalle avec bride d'attache. Elles sont calculées en supposant des charges certifiées et un terrain standard. Si les hypothèses utilisées varient, les valeurs définies ne seront pas valables et il sera nécessaire de réexaminer les fondations.

Si la semelle est fournie par le client, la conception de celle-ci sera vérifiée et qui devra recevoir les informations adéquates afin de pouvoir réaliser cette vérification. Le système de mise à la terre doit respecter la spécification.

II.2 Matériaux

Les matériaux utilisés pour la réalisation des éléments de l'éolienne sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, 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 qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

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

On rencontre plusieurs types de matériaux [14]:

- ❖ **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.

Type S : $E=87 \text{ GPa}$, $\nu=0.26$,

Type R : $E=86 \text{ GPa}$, $\nu=0.215$,

Type E : $E=73 \text{ GPa}$, $\nu=0.22$,

Type C : $E=70 \text{ GPa}$, $\nu=0.21$,

- ❖ **Les aciers** : leur intérêt est de permettre résisté à les charges dynamique ainsi que à être résistants à la fatigue mécaniques. Annexe 6

II.3 Les caractéristiques des poids généraux

Les données caractéristiques des points généraux et les dimensions de l'éolienne sont traduites sous forme de tableau suivant :

Tableau II.1: Caractéristiques générales.

Composant	G52	dimension
Nacelle	23(t)	8 X2.5X2.5 (m)
Arbre principale	420(kg)	D=150mm, l=3m
Rotor	11.6(t)	R=26m
Tour	60(t)	D ₁ = 2.4m D ₂ = 2.9m

II.4 Aérodynamique de l'éolienne

II.4.1 Théorie de betz

L'une des théories élémentaires utilisées dans la conception des rotors d'éoliennes est la théorie attribuée à Betz (1929) (modèle du disque actuateur). Les développements de Betz peuvent être utilisés pour déterminer, et ce pour une éolienne idéale, la poussée développée par le vent et l'influence du rotor sur l'écoulement du vent [15].

Modèle du disque actuateur : en mécanique des fluides, le disque actif est défini comme une surface de discontinuité où des forces de surface agissent sur l'écoulement. Ce modèle est extrêmement simplifié et repose sur les hypothèses suivantes :

Hypothèses :

- Fluide homogène et incompressible;
- La géométrie du rotor est effacée et ce dernier n'est représenté que par un disque d'épaisseur nulle de diamètre D du rotor;
- Ecoulement stationnaire, irrotationnel;
- Poussé uniforme dans tout le disque rotor;
- La pression statique loin en amont et en aval du rotor est égale à la pression statique de l'ambiance.
- Non rotation du disque ;

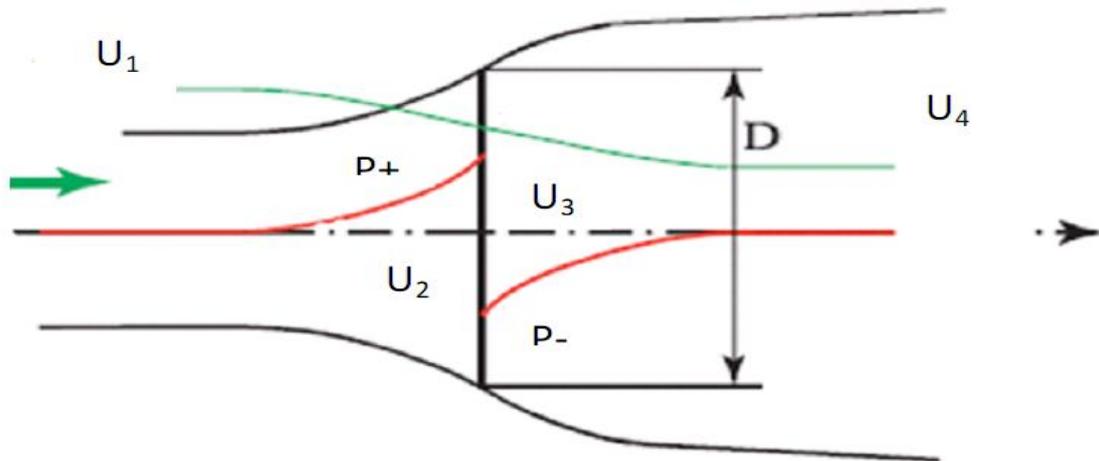


Figure II.2 : Modélisation du rotor éolien par un disque actuateur [15].

II.4.2 Facteur d'induction axiale

En appliquant la conservation de quantité de mouvement au volume de contrôle (fig13) on peut écrire :

$$T = U_1(\rho_a AU_1) - U_4(\rho_a AU_4) \quad (\text{II.1})$$

Avec : A section du disque rotor

ρ_a : Masse volumique de l'air

U : vitesse de l'air

Sachant que l'écoulement est stationnaire $\frac{dm}{dt} = 0$ on aura :

$$U_1(\rho_a AU_1) = U_4(\rho_a AU_4) = \dot{m} \quad (\text{II.2})$$

Donc

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (\text{II.3})$$

La poussée étant positive, la vitesse décroît de l'amont vers l'aval $U_1 > U_4$, A présent essayons de déterminer une relation entre les vitesses des différentes zones.

En amont et en aval du disque, nous avons aucune production de travail, ce qui nous permet d'appliquer l'équation de Bernoulli dans les deux volumes contrôle amont et aval.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho_a U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho_a U_2^2 \quad (\text{II.4})$$

$$P_3 + \frac{1}{2} \rho_a U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho_a U_4^2 \quad (\text{II. 5})$$

La poussée peut être exprimée en fonction des forces agissant de part et d'autre du disque rotor :

$$T = A_2(P_1 - P_2) \quad (\text{II. 6})$$

D'après les hypothèses on a $p_1=p_4$, et en admettant que la vitesse axiale au niveau du rotor reste constante ($U_2=U_3$), on obtient en combinant les équations (II.4), (II.5) et (II.6) :

$$T = \frac{1}{2} \rho_a A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (\text{II. 7})$$

En égalisant les équations (II.7) et (II.3) avec $\dot{m} = \rho A_2 U$:

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (\text{II.8})$$

Finalement on trouve comme résultat que la vitesse au niveau du rotor est la moyenne des vitesses amont et aval de l'écoulement.

On définit le coefficient d'induction axiale a , pour avoir les expressions des vitesses au niveau du rotor et en aval en fonction de la vitesse amont U_1 .

$$a = \frac{U_1 + U_2}{U_1} \quad (\text{II.9})$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (\text{II.10})$$

$$U_4 = U_2(1 - 2a) \quad (\text{II.11})$$

Remarque :

- Des équations (II.8) et (II.9) on déduit que la vitesse induite au niveau du rotor est égale à la moitié de la vitesse induite à l'infini aval.
- On peut aussi remarquer que la vitesse en aval du rotor peut être égale à zéro si le coefficient $a=1/2$. La théorie de Betz est limitée par le coefficient d'induction axiale qui ne peut dépasser la valeur limite de 0.5.

II.4.3 Coefficients de puissance et de poussée

La force dynamique du vent :

$$F = \frac{1}{2} \rho A U^2 \quad (\text{II.12})$$

On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{\text{puissance du rotor}}{\text{puissance disponible dans le vent}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (\text{II.13})$$

La puissance du rotor est égale à la poussée que multiplie la vitesse axiale U_2 .

$$P = \frac{1}{2}\rho_a A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2}\rho_a A_2 U_2 (U_1 - U_4)(U_1 + U_4) \quad (\text{II.14})$$

En substituant U_4 et U_2 par les équations (10) et (11) la puissance du rotor s'exprime par :

$$P = \frac{1}{2}\rho_a AU^3 4a(1-a)^2 \quad (\text{II.15})$$

Alors le coefficient de puissance est :

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (\text{II.16})$$

On définit le coefficient de poussée par la relation suivante :

$$C_T = \frac{\text{poussée}}{\text{force dynamique du vent}} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho_a AU^2} \quad (\text{II.17})$$

$$T = \frac{1}{2}\rho_a AU_1^2 4a(1-a) \quad (\text{II.18})$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (\text{II.19})$$

II.4.4 Limite de Betz

Pour déterminer le coefficient de puissance maximale, il suffit de dériver l'expression (II.15) et de l'égaliser à zéro, ce qui nous donne :

$$C_{p_{\max}} = 0.5962$$

Si on arrive à concevoir un rotor permettant d'avoir une vitesse axiale égale au 2/3 de la vitesse amont du vent, alors le rotor nous fournira le maximum de puissance; et d'après les lois basiques de la physique c'est la puissance maximale possible.

Le coefficient de poussée a pour expression données par l'équation (II.18). C_T maximum a pour valeur 1, qui correspond à un facteur d'induction axiale $a=0,5$ et à une vitesse aval égale à zéro. Pour un maximum de puissance, le coefficient de poussée a la valeur de 8/9. La figure illustre les variations des coefficients de puissance et de poussée pour un rotor idéal en fonction du coefficient d'induction axiale a [16].

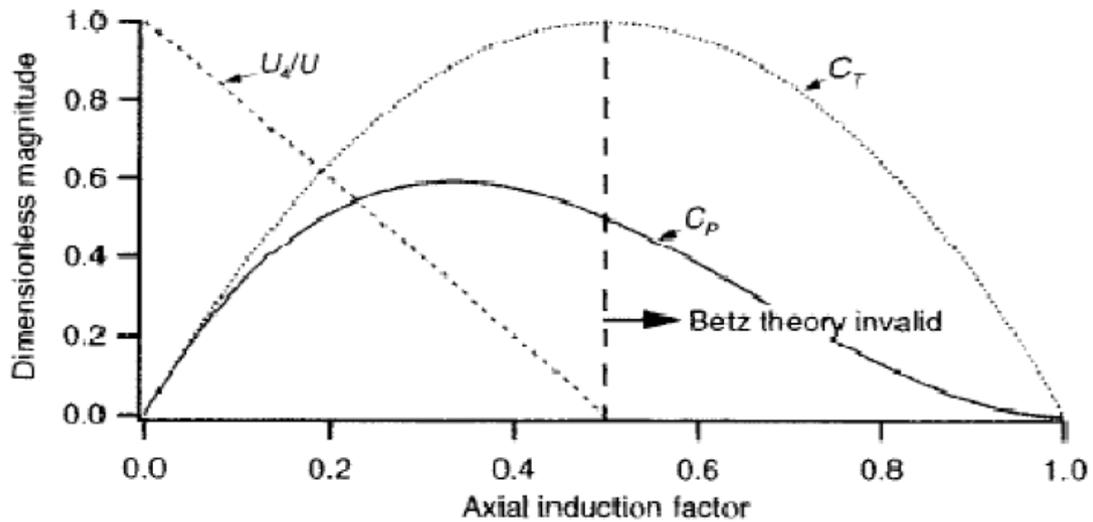


Figure II.3 : Paramètres opératoires d'une turbine Betz [16].

II.4.5 La courbe de puissance électrique de l'éolienne

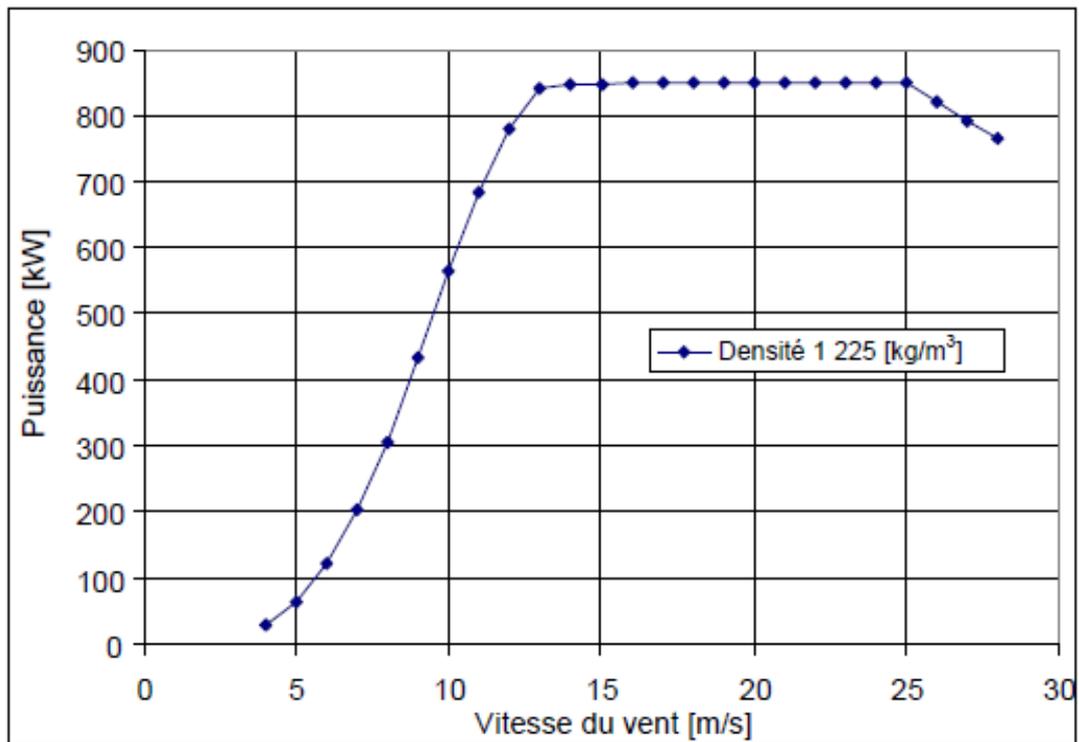


Figure II.4 : La courbe de puissance électrique [14].

La figure 15 présente les résultats de la courbe de puissance. L'éolienne a été dimensionnée pour une puissance de 850 kW. Nous remarquons que le maximum est atteint autour de 850

kW pour une vitesse de 12-13 m/s. Ceci est dû aux hypothèses utilisées lors de la détermination de la géométrie

II.4.6 La courbe de C_p et C_T :

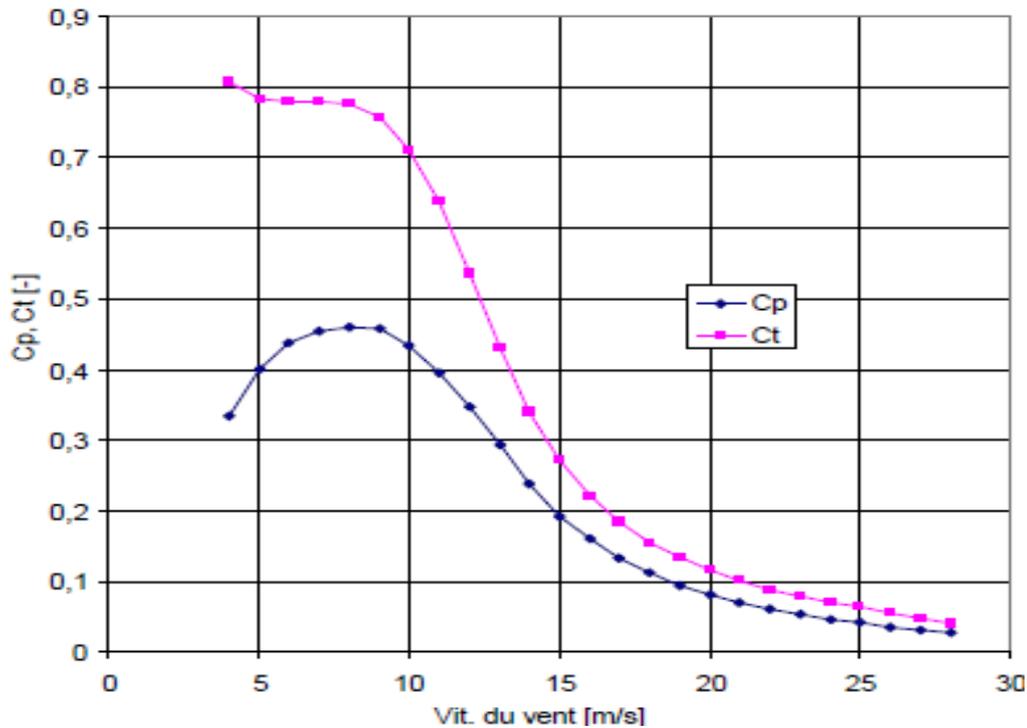


Figure II.5 : courbe de C_p et C_T [14].

II.4.7 Caractéristique du capteur éolienne [16]

Il existe 2 principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien :

II.4.7.1 Paramètre de vitesse

Le paramètre de vitesse λ est le rapport de la vitesse maximale de déplacement de l'aubage U_0 à la vitesse du vent U avec $U_0 = \omega R$

$$\lambda = \frac{U_0}{U} = \frac{\omega R}{U} \quad (\text{II.20})$$

Le choix de la vitesse spécifique dépend de plusieurs paramètres, il est en fonction de couple de démarrage, coefficient de puissance, le nombre de pales, et le profil de la pale.

Le tableau ci-dessous propose des valeurs suivant le nombre de pales.

Tableau II.2 : Le nombre de pale en fonction de la vitesse spécifique [16].

La vitesse spécifique λ	Nombre de pale
1	8 à 24
2	6 à 12
3	3 à 6
4	3 à 4
>4	1 à 3

De fortes valeurs de λ permettent un meilleur rendement et des meilleures possibilités d'utilisation.

Les éoliennes rapides peuvent avoir un λ égale 20. cependant une grande vitesse de rotation peut entraîner des nuisances telles que le bruit, dans notre éolienne la vitesse spécifique est donnée $\lambda=4$.

II.4.7.2 Coefficient de couple et le couple aérodynamique

C'est le rapport
$$C_C = \frac{C_{max}}{C_a} \quad (II.21)$$

C_{max} : Couple moteur qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien

C_a : Le couple aérodynamique, il est donné par la formule suivante :

$$C_a = \frac{1}{2} c_q \rho A U^2 R \quad (II.22)$$

Avec
$$c_q = c_p / \lambda \quad (II.23)$$

P : est la puissance

$$P = C * \omega \quad (II.23)$$

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, une brève description sur notre système éolien a été présentée ainsi que toutes les caractéristiques et fonctionnements de chaque élément, ajouté un rappel des principales théories aérodynamiques dont nous aurons besoin dans les chapitres suivants.

CHAPITRE III :

ETUDE MECANIQUE

III Schéma cinématique

La figure suivante représente le schéma cinématique d'une éolienne à axe horizontal.

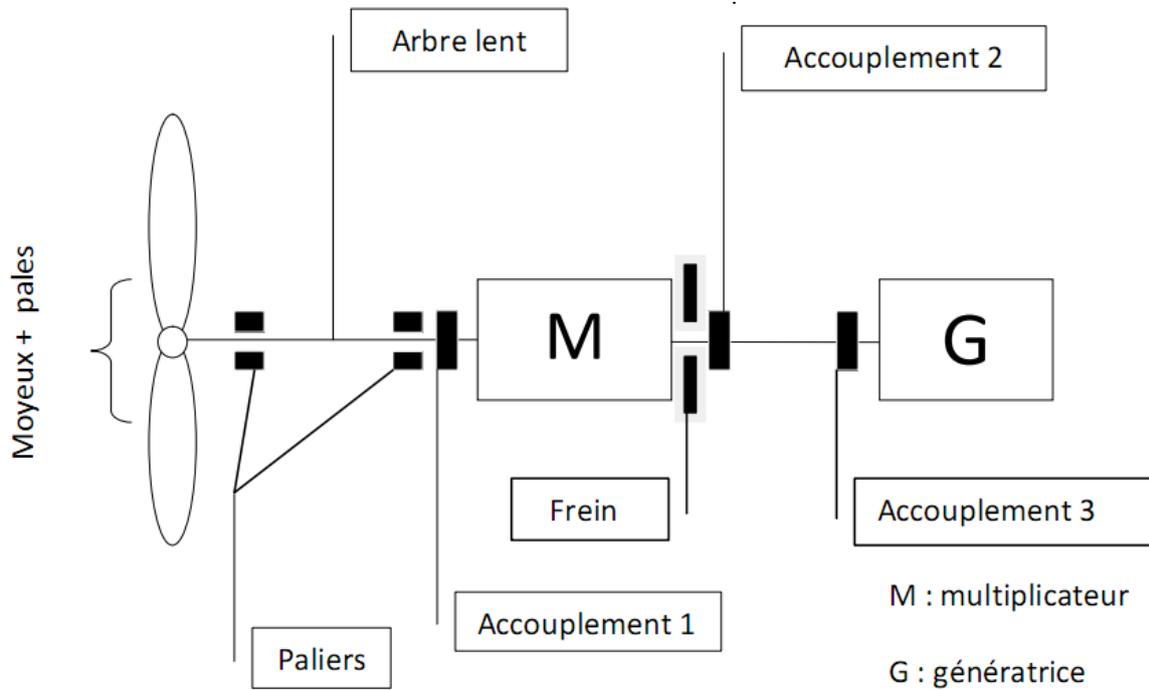


Figure III.1 : Schéma cinématique de l'éolienne à axe horizontal

III.1 Rappel sur les résistances des matériaux [20]

- ❖ Traction et compression

Contrainte normale sont définies par :

$$\sigma_n = \frac{N}{S} \tag{III.1}$$

La loi Hooke

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{III.2}$$

La forme généralisée de la loi de Hooke

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases} \tag{III.3}$$

- ❖ Cisaillement –flexion

La contrainte tangentielle est définie par :

$$\tau = G\gamma \tag{III.4}$$

G : module de glissement

γ : Angle de glissement

❖ Flexion pure

La contrainte est définie par :

$$\sigma = \frac{M_z y}{I_z} \quad (\text{III.5})$$

Pour la contrainte maximale :

$$\sigma = \frac{M_z}{I_z/v} \leq R_p \quad (\text{III.6})$$

R_p : résistance élastique pratique

I_z/v : Module de flexion de la section de la poutre

❖ Critère de Tresca :

Il est utilisé pour les aciers doux et les alliages légers :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau^2} \quad (\text{III.7})$$

❖ Critère de Von Misès :

Il est utilisé pour l'ensemble des matériaux métalliques

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2} \quad (\text{III.8})$$

III.2 Les pales

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

Nous considérerons que la pale est en forme de tronc 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 à chaque section « i » caractérisée par :

- D_i : diamètre du cercle égal à la corde de la station i ;
- e_i : épaisseur de l'anneau ;
- Δr : espacement entre section ;

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

$$\sigma_x < \frac{\sigma_e}{cs} \quad (\text{III.9})$$

σ_e : Limite élastique en extension du matériau CS : coefficient de sécurité.

$$\sigma_x = \sigma_f + \sigma_n = \frac{M_f d}{2I} + \frac{F_c}{A} \quad (III.10)$$

M_f : Moment de flexion ; F_c : force centrifuge ; I : moment quadratique de la section

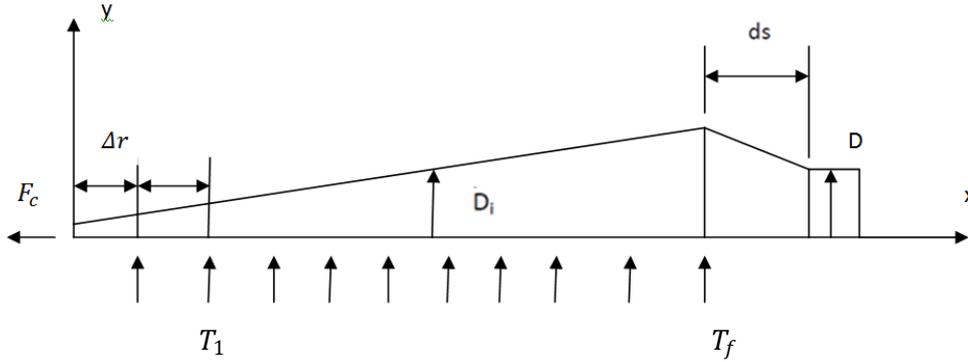


Figure III.2 : Modélisation du chargement sur la pale.

T_i : sont les résultantes des forces tangentielle et axiales pour chaque section « i ».

$$T_i = \sqrt{T_{ti}^2 + t_{ai}^2} \quad (III.11)$$

$$\Delta r = \frac{(R - r_m - ds)}{n} \quad (III.12)$$

r_m Rayon du moyeu a : longueur du support de la pale ;

• **Calcul du moment fléchissant :**

Pour une section donnée « i » :

$$x \in [i\Delta r, (i + 1)\Delta r] \quad M_{Ti} = \left(\sum_{k=1}^{i-1} (i - k) T_f \right) \Delta r \quad (III.13)$$

Sachant que, pour une station i:

$$I_i = \frac{\pi}{64} (d_i^4 - (d_i - 2e_i)^4) \quad (III.14)$$

$$A_i = \frac{\pi}{4} (d_i^2 - (d_i - 2e_i)^2) \quad (III.15)$$

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

$$\sigma_f = \frac{\left(\sum_{k=1}^{i-1} (i - k) T_F \right) \Delta r (d_i - 2e_i)}{\frac{\pi}{32} (d_i^4 - (d_i - 2e_i)^4)} \quad (III.16)$$

La condition de résistance s'écrit alors :

$$\sigma = \frac{(\sum_{k=1}^{i-1} (i-k) T_F) \Delta r (d_i - 2e_i)}{\frac{\pi}{32} (d_i^4 - (d_i - 2e_i)^4)} + \frac{F_c}{\frac{\pi}{4} (d_i^2 - (d_i - 2e_i)^2)} < \frac{\sigma_e}{cs} \quad (III.17)$$

Remarque : Le diamètre D du pied de la pale doit être vérifié au cisaillement.

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\frac{\pi}{4} D^2} < \frac{\tau_{adm}}{cs} \quad (III.18)$$

τ_{adm} Contrainte admissible en cisaillement.

III.3 L'arbre principal

L'arbre est soumis aux contraintes de compression (force de poussée du rotor), contrainte de flexion (poids propre de l'arbre), et une contrainte de torsion due au couple de l'hélice.

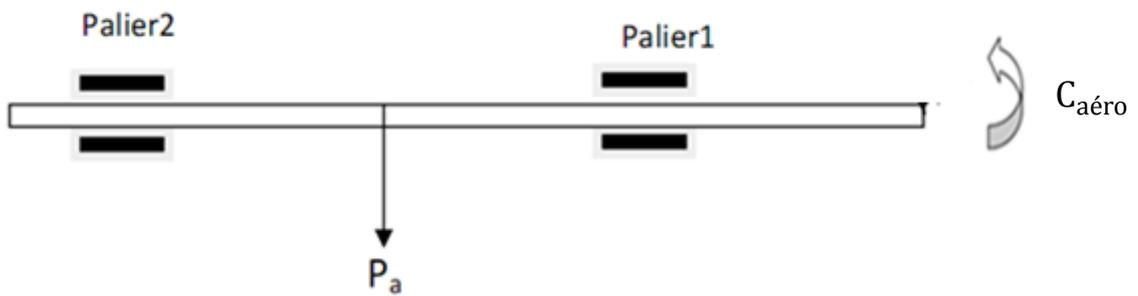


Figure III.3 : chargement de l'arbre.

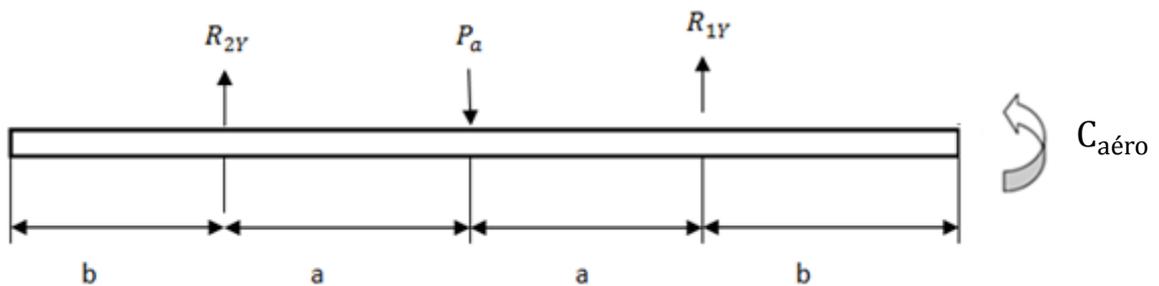


Figure III.4 : Schématisation du chargement d'arbre.

$$\sum F = 0, \sum M_{/O} = 0 \quad (III.19)$$

$$\begin{cases} R_{1Y} + R_{2Y} = P_a \\ R_{1Y} \cdot a + R_{2Y} \cdot (2a + b) = P(a + b) \end{cases} \quad (III.20)$$

Avec $a=2b$,

La résolution du système d'équation nous donne :

Les arbres de transmission :

- Arbre 1 : $D_1 = 120\text{mm}, l = 500\text{mm}$.
- Arbre 2 : $D_2 = 80\text{mm}, l = 300\text{mm}$.
- Arbre 3 : $D_3 = 80\text{mm}, l = 300\text{mm}$.
- Arbre 4 : $D_4 = 80\text{mm}, l = 200\text{mm}$.

• **Calcul de la torsion des arbres :**

Les arbres sont soumis essentiellement en torsion.

$$\tau = \frac{32C}{\pi d^3} \tag{III.23}$$

• **Etudes des dentures des engrenages :**

Dans les conditions énoncées, la condition de résistance en flexion s'écrit pour les dentures normales :

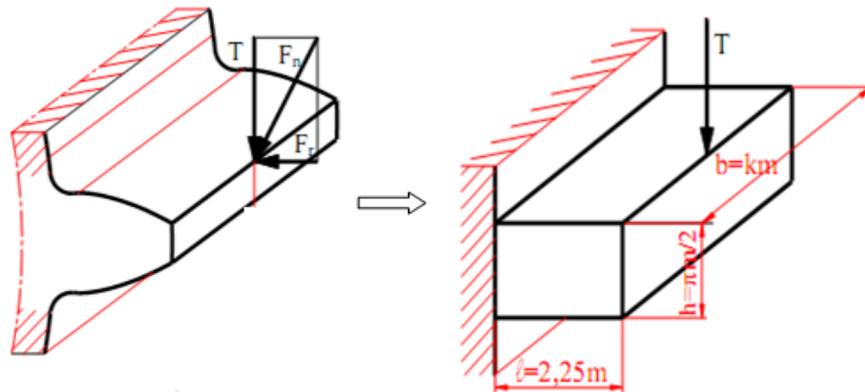


Figure III.6 : Passage d'une denture cylindrique à une poutre rectangulaire encadrée.

$$\sigma_{f \max} = \frac{M_{f \max}}{\left(\frac{I}{v}\right)} \leq \sigma_p \tag{III.24}$$

σ_p : est la contrainte admissible à la traction du matériau.

Le moment fléchissant maximal vaut :

$$\begin{cases} M_{f \max} = l * T \\ C = R * T \end{cases} \tag{III.25}$$

Pour une section rectangulaire, le module de section I/v est donné par la relation :

$$\frac{I}{v} = \frac{bh^2}{6} \tag{III.26}$$

h : étant la hauteur de la section, et b sa largeur.

Avec $b = k.m$ et $h = \frac{\pi m}{2}$,

On aura :
$$\frac{1}{V} = \frac{\pi^2}{24} k \cdot m^3 \tag{III.27}$$

La poutre étant supposée de longueur : $l = 2,25m$, on a alors :

$$m \geq 2,34 \sqrt{\frac{T}{k \cdot \sigma_p}} \quad (\text{Formule de Lewis simplifiée}) \tag{III.28}$$

Dans cette formule, T et σ_p doivent être exprimés avec la même unité de l'effort (exemple N/mm^2), et m module en mm . [18].

III.5 La tour

Dans les constructions d'éolienne, la hauteur du mat qui supporte la nacelle est équivalente à 1,5 le diamètre du rotor. Nous avons vu les différentes hauteurs de notre éolienne, donc pour notre éolienne nous avons pris la hauteur à 55m et de $\theta = 0.4^\circ$.

La tour est soumise au poids P_n de la nacelle, la force de poussé T du rotor et à la force du vent. La figure suivante modélise le chargement de la tour

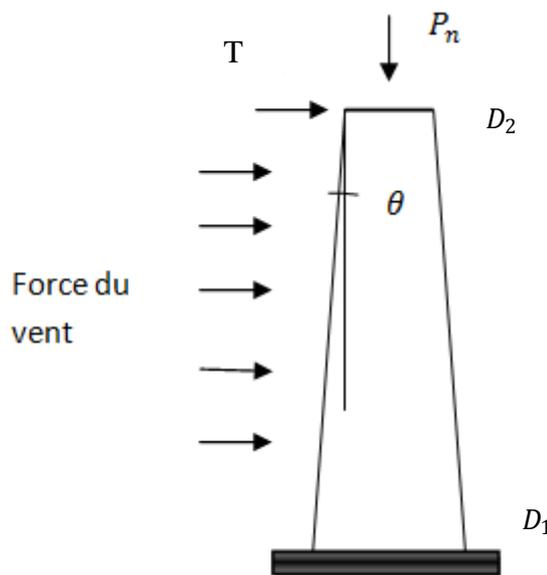


Figure III.7 : les charges de la tour.

- **résistances à la flexion-compression :**

Contrainte normale :

$$s = (D_2^2 - D_1^2) \frac{\pi}{4} \tag{III.29}$$

$$\sigma_n = \frac{P_n}{s} \tag{III.30}$$

Contrainte de flexion :

$$s = \frac{(D_1 - D_2)}{2} (\sqrt{1 + \cos^2 \theta}) \pi h \tag{III.31}$$

$$\sigma_f = \frac{M_x}{\frac{I_x}{v}} = \frac{h(T + \frac{1}{2}\rho U^2 S)}{\frac{I_x}{v}} \tag{III.32}$$

III.6 Les accouplements

Pour notre analyse nous avons suivi la procédure que préconise le fabricant ROTEX dans son catalogue.fig III.8

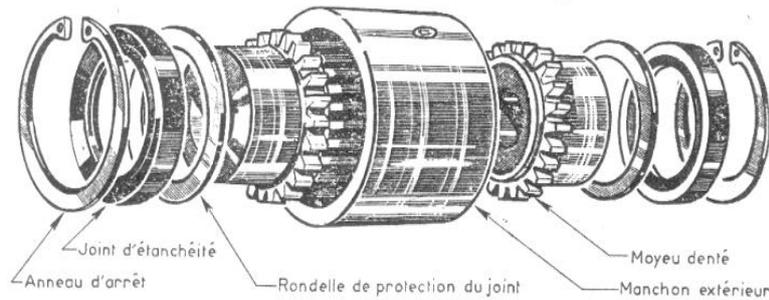


Figure III.8 : Développement d'un accouplement Rotex sur DAO 3D.

La détermination des accouplements Rotex se fait d'après la norme DIN740-2.Les accouplements Rotex doivent être déterminés de telles sortes qu'en tenant compte des différents facteurs de services, le couple qu'ils peuvent transmettre ne soit pas dépassé. Il faut Donc procéder à une comparaison des charge de produisant avec les caractéristiques préconisées, les donne technique de ce type accouplement sont donne par (annexe 3)

- **Charge occasionnée par le couple nominal**

Le couple nominal T_{KN} autorisé de l'accouplement doit être en tenant compte de la température ambiante, au moins aussi grande que le couple nominal de l'installation. Soit

$$T_{KN} \geq T_N S_T \tag{III.33}$$

Tableau III.1 : Valeur du coefficient de températures [21].

T	-30°C à + 30°C	+40°C	+60°C	+80°C
S_T	1	1.2	1.4	1.8

III.7 Calcul des freins:

Le dispositif de freinage installé est un frein à disque composé d'un disque (d), représenté Figure III.9 et de deux étriers. Le frein est placé à la sortie du multiplicateur ou le couple est inférieur comparé à l'entrée du multiplicateur. Le freinage est réalisé par pression des garnitures d'usure assurant le serrage de part et d'autre du disque. Chaque étrier supporte 2 garnitures pour lesquelles la surface de contact est représentée Figure III.10 Le dispositif de freinage comporte deux étriers [22].



Figure III.9 : Etrier de frein.
garniture/frein

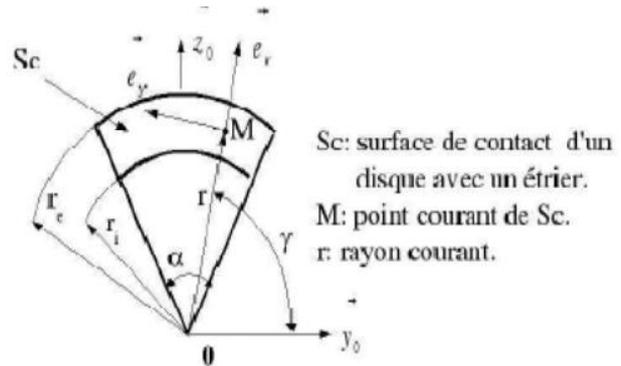


Figure III.10 : Zone de contact.

Le couple de freinage doit être supérieur au couple de l'arbre de sortie du multiplicateur. Sachant que le couple de freinage est donné par la formule suivante :

$$C_{fr} = F \frac{D}{2} \tag{III.34}$$

F : force de frottement due à la pression exercée par l'étrier

$$F = \mu \rho S_c \tag{III.35}$$

μ : coefficient de frottement.

III.8 Etudes de la clavette

On cherche à transmettre le couple entre l'arbre et l'alésage. La clavette est donc soumise à un effort de cisaillement et à la pression de contact [20].

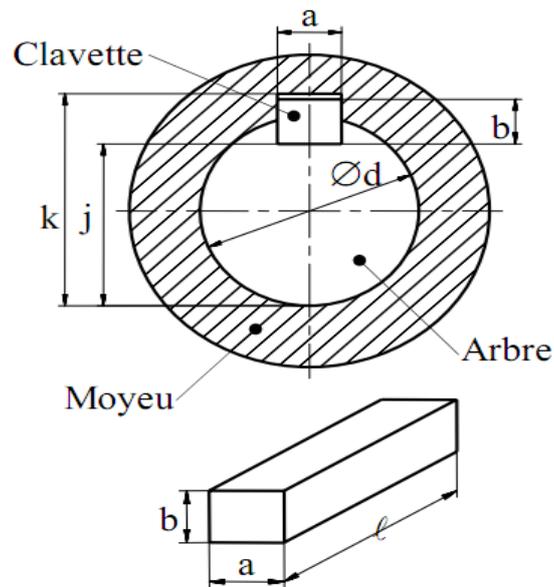


Figure III.11 : Montage par clavette [20].

- Effort de cisaillement

Connaissant le couple à transmettre, on a :

$$C_t = F \cdot \frac{d}{2} \quad (\text{III.36})$$

- L'effort de cisaillement F vaut :

$$F = \frac{2C_t}{d} \quad (\text{III.37})$$

- Contrainte moyenne de cisaillement

La section cisailée est :

$$l = a \cdot S \quad (\text{III.38})$$

La contrainte moyenne de cisaillement est :

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{a \cdot l} = \frac{2 \cdot C_t}{d \cdot a \cdot l} \quad (\text{III.39})$$

Pression de matage dans la partie clavette-arbre

$$\sigma_1 = \frac{F}{S_1} = \frac{2C_t}{d \cdot l \cdot a} \quad (\text{III.40})$$

Pression de matage dans la partie clavette-alésage

$$\sigma_2 = \frac{F}{S_2} = \frac{2C_t}{d.l.(b-a)} \quad (\text{III.41})$$

III.9 Calcul des roulements

- **Durée nominale L10**

Pour une vitesse de rotation N en tr/mn, la durée de vie nominale exprimée en heures est donnée par la relation :

$$L_{10h} = \frac{10^6 L_{10}}{60N} \quad (\text{III.42})$$

- **Charge dynamique de base**

La charge dynamique de base C est la valeur de cette constante.

Il vient :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \quad (\text{III.43})$$

n = 3 pour les roulements à billes

n = 10/3 pour les roulements à rouleaux

La charge dynamique de base C est fournie dans les catalogues des fabricants pour chaque roulement.

- **Charge dynamique équivalente**

La charge dynamique équivalente est définie par :

$$\begin{cases} P = F_r & \text{si } \frac{F_a}{F_r} \leq e \\ P = XF_r + YF_a & \text{si } \frac{F_a}{F_r} > e \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

Les coefficients X et Y sont aussi indiqués dans les catalogues de roulements des constructeurs

- **Charge Statique équivalente**

C'est la charge fictive provoquant les mêmes déformations permanentes que la charge réelle.

On l'obtient à l'aide de la formule :

$$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a \quad (\text{III.45})$$

Si $P_0 < F_r$, prendre $P_0 = F_r$

Les valeurs de X_0 et Y_0 sont données dans l'annexe 1 [19].

- **Coefficient de sécurité statique**

Il est défini par le rapport :

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (\text{III.46})$$

Le facteur S_0 exprime la sécurité contre une déformation permanente et assure un fonctionnement silencieux (annexe 2) [19].

III.10 La génératrice

Les principaux paramètres du dimensionnement sont géométriques (diamètre d'alésage, longueur utile, dimensions des encoches), électriques (densité de courant et charge linéique...), magnétiques (induction dans l'entrefer et dans les différents tronçons de la machine) et mécaniques (entrefer et vitesse de rotation). Chacun de ces paramètres a une importance lors du dimensionnement [20].

Après avoir choisi des valeurs initiales pour le chargement électrique et magnétique spécifique, le facteur de puissance et le rendement, on calcul ces paramètres.

- ❖ **La vitesse de rotation :**

La vitesse de rotation du champ magnétique tournant est imposée par le nombre de pôles du stator et la fréquence d'alimentation :

$$\eta_S = \frac{60 f}{p} \quad (\text{III.47})$$

- ❖ **La puissance apparente**

La puissance apparente est exprimée par :

$$S = \frac{P_n}{\eta_n \cos \varphi_{1n}} \quad (\text{III.48})$$

- ❖ **La puissance conventionnelle :**

La puissance conventionnelle est donnée par la relation suivante :

$$P' = \frac{P_n \cdot K_E}{\eta_n \cos \varphi_{1n}} \quad (\text{III.49})$$

K_E : est le coefficient qui tient compte des chutes ohmiques dans l'enroulement statorique.

Il est défini :

$$K_E = 0.985 - 0.004.P \tag{III.50}$$

❖ **Diamètre interne du stator**

Il doit être déterminé à partir de la Figure III.12, qui donne le diamètre interne de stator en fonction de P' pour une valeur de p donnée.

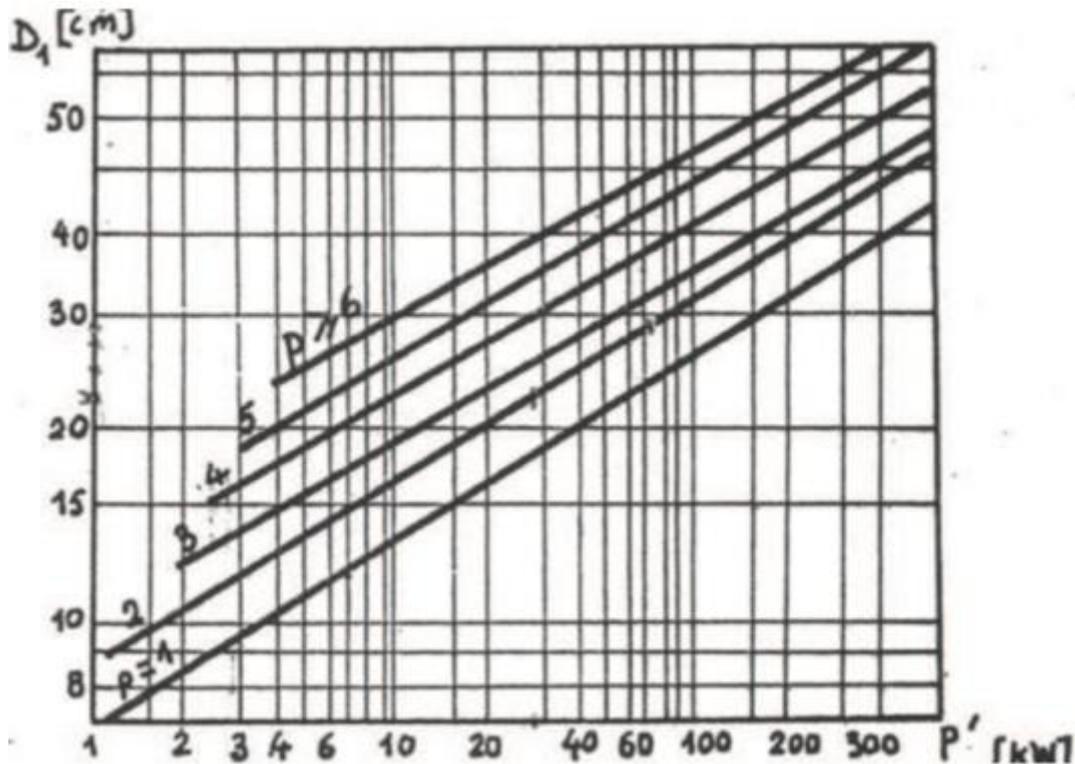


Figure III.12 : Diamètre interne du stator en fonction de la puissance conventionnelle.

❖ **Diamètre externe du stator**

Les valeurs standards du diamètre externe du stator pour les génératrices sont données par le Tableau suivant:

Tableau III.2 : Diamètre extérieur du stator en fonction du nombre de pôles.

2p	2	4	6	8
D_{1ext}/D_1	1.85 / 1.95	1.56 / 1.61	1.41 / 1.44	1.34 / 1.35

❖ **Longueur de la machine :**

Elle peut être calculée en utilisant l'expression suivante :

$$l = \frac{6,1 \cdot 10^{11} \cdot P'}{\alpha_\delta K_\beta K_b 0b_1 A_1 B_\delta \eta_s D_1^2} \tag{III.51}$$

❖ Diamètre externe du rotor

Le diamètre externe du rotor est exprimé par :

$$D_{ext2} = D_1 - 2.e \quad (\text{III.52})$$

η_s et $\cos\varphi$: Données par annexe 4. [20].

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, un rappel des principales théories de résistance des matériaux a été présenté ainsi qu'une étude mécanique des différents éléments de l'éolienne.

CHAPITRE IV :

RESULTATS PAR LA SIMULATION SOLIDWORKS

Solidworks est un logiciel de dessin et conception assisté par ordinateur DAO et CAO. il est considéré comme un outil essentiel dans le domaine de la conception mécanique, il permet, avec ses diverses fonctionnalités, d'aborder des problèmes de dimensionnement complexes et de les résoudre dans délais très courts, comparé aux méthodes conventionnelles.

Ces fonctionnalités principales sont :

- modélisation numérique ;
- simulation mécanique et calcul des matériaux ;
- représentation graphique ;
- dessin de plan ;
- manipulation d'objets 3D ;
- gestion d'assemblages.

La principale étape à suivre lors du travail de simulation est résumée par introduire tous les paramètres qui sont nécessaires pour faire la simulation, à savoir les types de fixation, les forces et le couple qui s'exercent sur les éléments étudiés.

IV Calcul aérodynamique

- ❖ Calculer les forces de poussées qui s'exercent sur les pales, pour des différentes vitesses du vent:

La surface balayée par la pale est la surface du disque : $A = \pi R^2 = 2003.64 \text{ m}^2$

Avec la figure II.5 : on prend la valeur C_T pour chaque vitesse

D'après l'équation (II.17) :

- $U = 5 \text{ m/s}$ $T = 25.482 \text{ KN}$
- $U = 7 \text{ m/s}$ $T = 49.626 \text{ KN}$
- $U = 12 \text{ m/s}$ $T = 100.348 \text{ KN}$
- $U = 25 \text{ m/s}$ $T = 48.004 \text{ KN}$

- ❖ Calcul des vitesses de rotation du rotor et de la génératrice :

D'après l'équation (II.20) et avec un multiplicateur de rapport de 60 :

Vitesse du vent	U=5 m/s	U=7 m/s	U=12 m/s	U=25m/s
$\omega_{aéro}$	0.76	1.07	1.84	3.84
$\omega_{gén}$	45.6	64.2	110.4	230.4

- ❖ Calculs des couples :

- Le couple utile de la génératrice :

L'équation(II.24), et la courbe de puissance on obtient:

- Pour une vitesse U=5 m/s :
 - $C_{gén} = 1.425 \text{ KN.m}$
- Pour une vitesse U=7 m/s :
 - $C_{gén} = 3.004 \text{ KN.m}$
- Pour une vitesse U= 12m/s :
 - $C_{gén} = 7.065 \text{ KN.m}$
- Pour une vitesse U= 25m/s :
 - $C_{gén} = 3.695 \text{ KN.m}$

- Le couple aérodynamique :

D'après les équations (II.23), (II.23), et la courbe de C_p on obtient :

- Pour une vitesse U=5 m/s :
 - $C_{aéro} = 91.0855 \text{ KN.m}$
- Pour une vitesse U=7 m/s :
 - $C_{aéro} = 190.809 \text{ KN.m}$
- Pour une vitesse U= 12m/s :
 - $C_{aéro} = 429.875 \text{ KN.m}$
- Pour une vitesse U= 25m/s :
 - $C_{aéro} = 225.477 \text{ KN.m}$

- ❖ Calculs des puissances :

D'après l'équation (II.24), on utilise les résultats trouvés précédemment, on résume les résultats sous forme d'un tableau :

Tableau IV.1: Résultats des calculs des puissances.

Vitesse du vent	P_{vent} (KW)	$P_{\text{aéro}}$ (KW)	$P_{\text{gén}}$ (KW)
U=5m/s	162.514	69.225	65
U=7m/s	445.940	204.166	198
U=12m/s	2246.602	790.971	780
U=25m/s	20314.328	865.834	850

D'après les résultats de calcul aérodynamique, nous remarquons que le couple maximal est atteint une valeur de 429.875 KN.m pour une vitesse de 12 m/s.

D'après les puissances calculées, on remarque qu'y a des pertes en niveau des éléments de l'éolienne.

IV Etude des pales

Après le dessin de la pale avec le logiciel Solidworks, on introduit le type de fixation ainsi que les charges calculées précédemment dans les deux cas statique et dynamique (rotation).

IV.1.1 Les pales en rotation

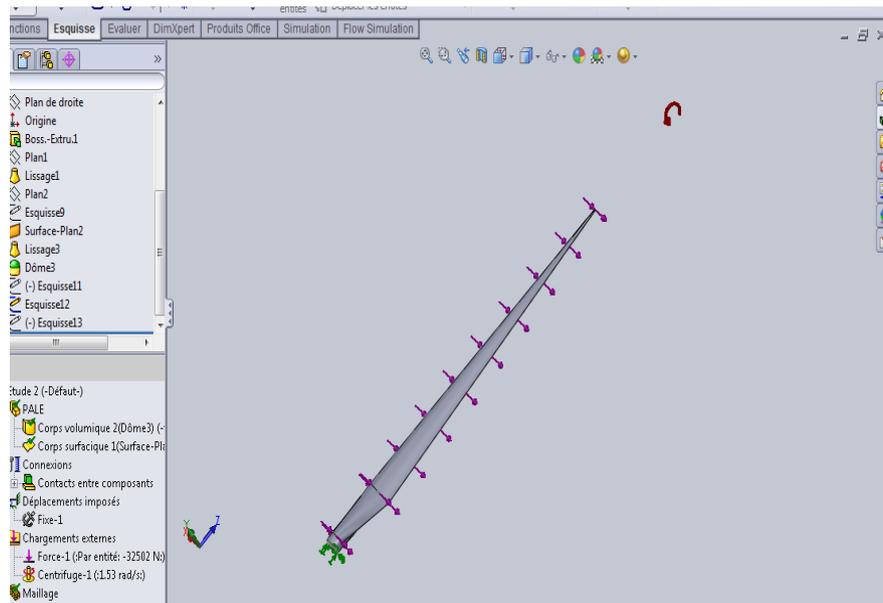


Figure IV.1 : Dessin de la pale soumise aux forces des vents.

- ✓ Pour une vitesse de 5m/s, avec un matériau composite en fibre de ver de type (S), on obtiendra les résultats suivants :

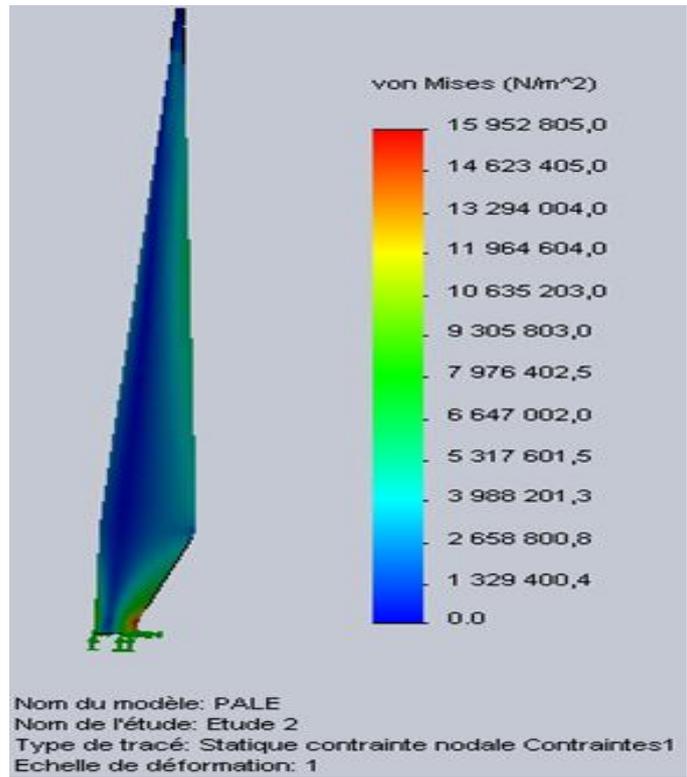


Figure IV.2 : Distribution des contraintes sur la pale.

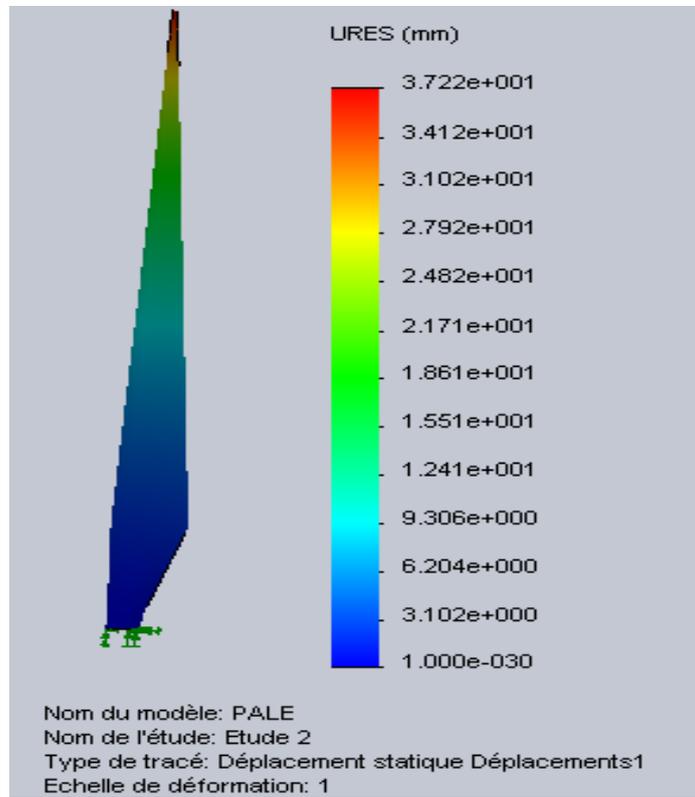


Figure IV.3 : Distribution des déplacements sur la pale.

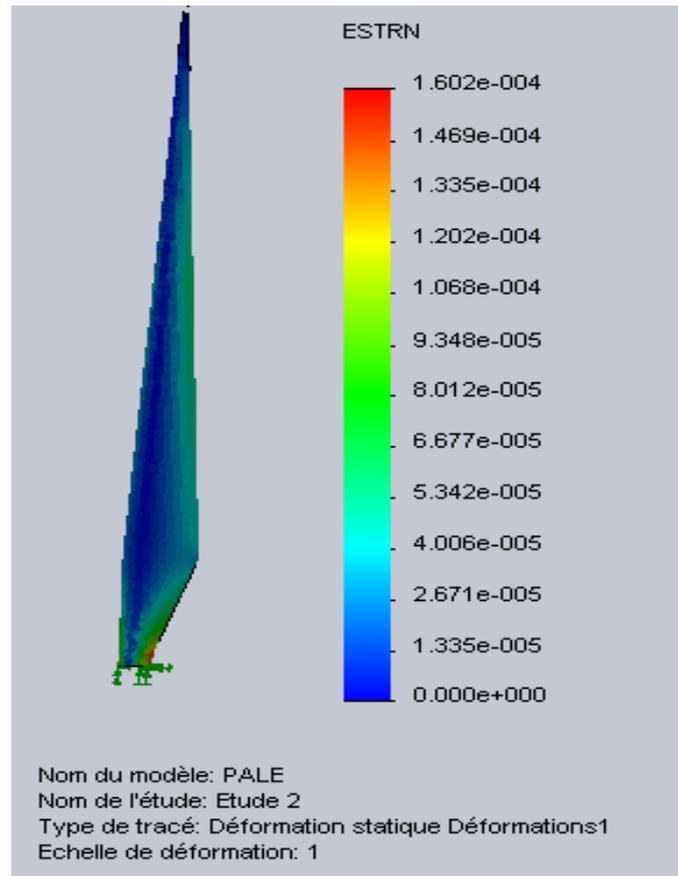


Figure IV.4 : Distribution des déformations sur la pale.

- ❖ Pour les autres vitesses et les autres matériaux cités auparavant, on prend le max de chaque simulation pour interpréter les résultats sous forme des tableaux :

Tableau IV.2: Résultats des contraintes maximales sur la pale en (KN/m²).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
composite				
Type S	15952	31270	91902	30499
Type R	15960	31281	91870	30553
Type E	15751	30675	90732	30238
Type C	15943	32241	91839	30393

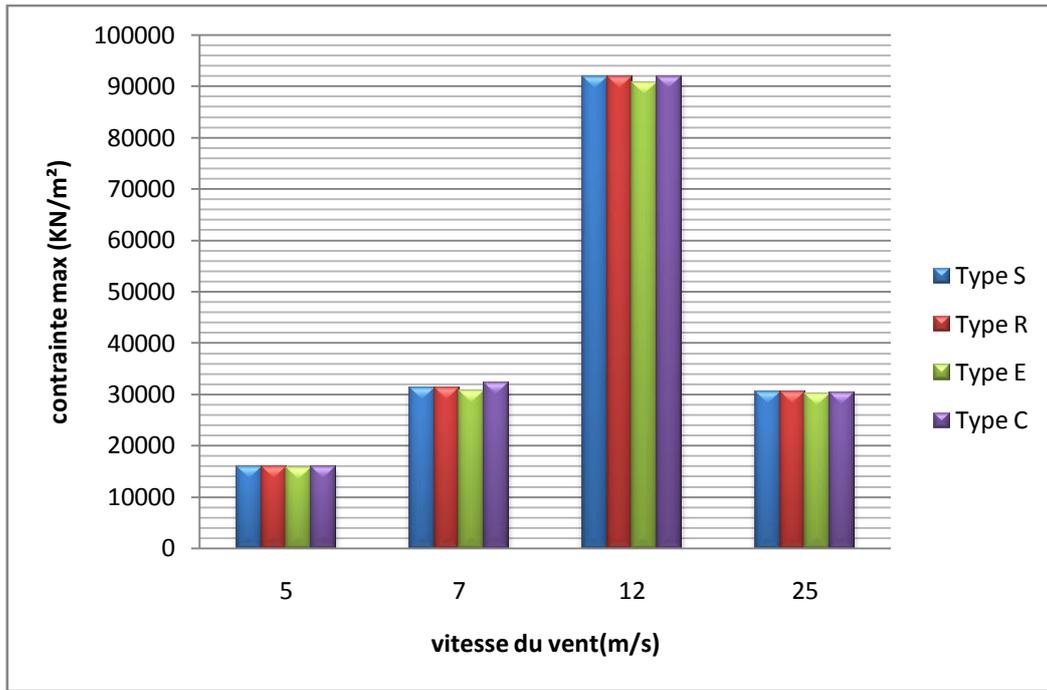


Figure IV.5 : Histogramme des contraintes maximales sur la pale.

Tableau IV.3: Résultats des déplacements maximaux sur la pale en (mm).

Matériaux composite	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Type S	37.22	70.91	174.3	65.20
Type R	31.58	61.90	161.9	63.50
Type E	30.91	60.58	158	61.33
Type C	33.51	65.68	173.0	69.3

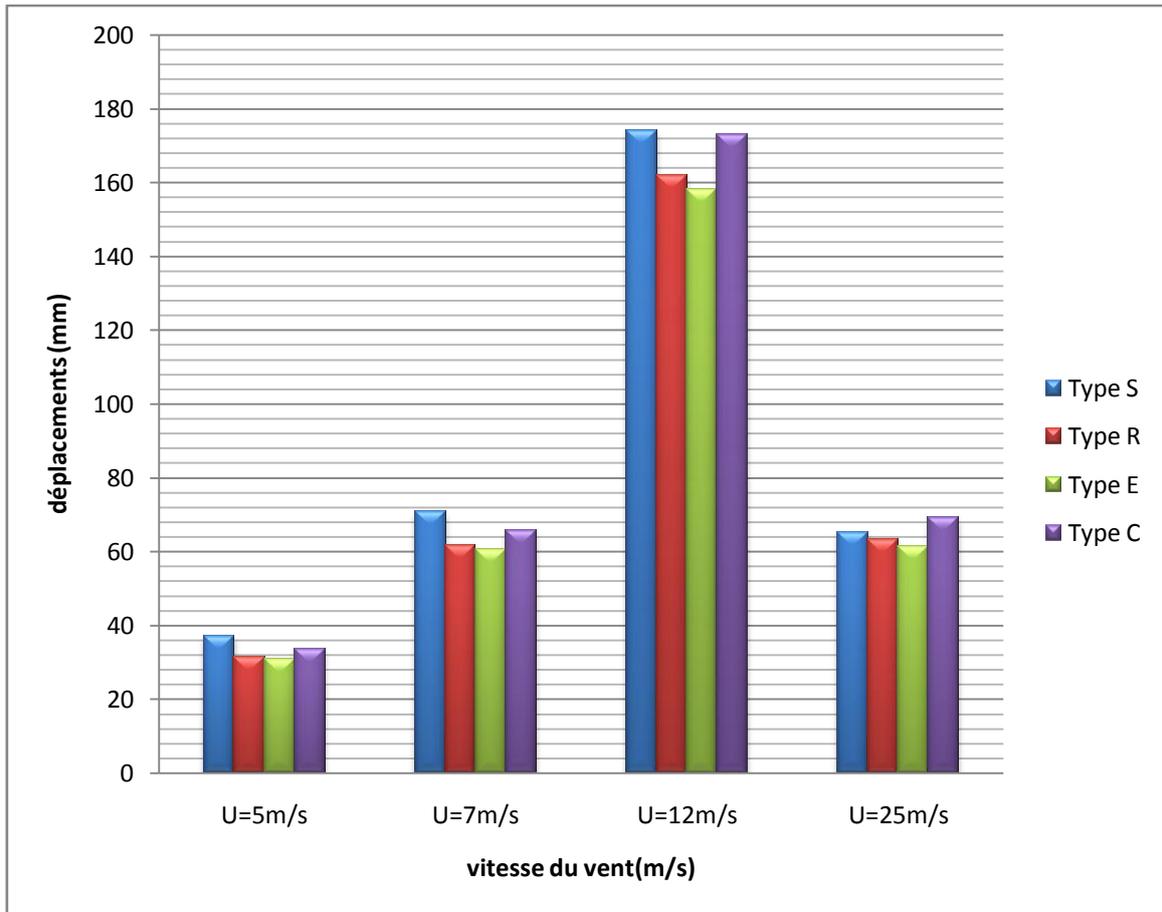


Figure IV.6 : Histogramme des résultats déplacements maximaux sur la pale.

Tableau IV.4: Résultats des déformations maximales sur la pale en (10^{-4} mm).

Matériaux composite	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Type S	1.602	3.141	8.231	2.93
Type R	1.534	3.007	8.536	2.97
Type E	1.355	2.656	7.804	2.79
Type C	1.456	3.153	8.985	3.11

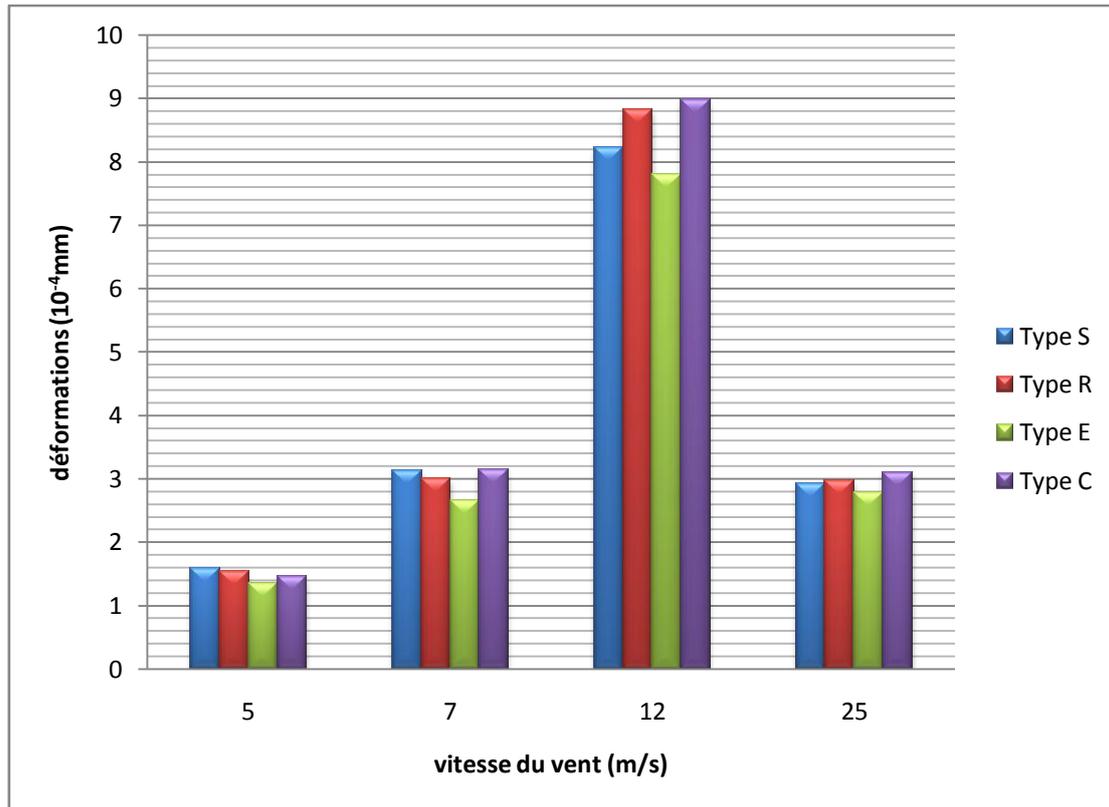


Figure IV.7 : Histogramme des déformations maximales sur la pale.

Les résultats des simulations indiquent que la pale n'est pas soumise à des contraintes qui dépassant la limite des matériaux, d'après l'étude on remarque que les fibres du ver de type E sont la plus adéquate pour les pales.

IV.1.2 Les pales dans le cas statique

Lorsque la vitesse du vent dépasse 25m/s, la machine se met à l'état d'arrêt, donc on essaie de voir le comportement mécanique avec une vitesse de 30m/s.

La surface balayée par le vent pour une pale : $S = 33.6 \text{ m}^2$

D'après l'équation (II.18), on calcule la force du vent qui s'exerce sur la pale pour la vitesse du vent suivante :

$$U = 30 \text{ m/s} \quad \Rightarrow \quad T = 18.105 \text{ KN}$$

- ❖ Pour un matériau composite en fibre de ver de type (R), on obtiendra les résultats suivants :

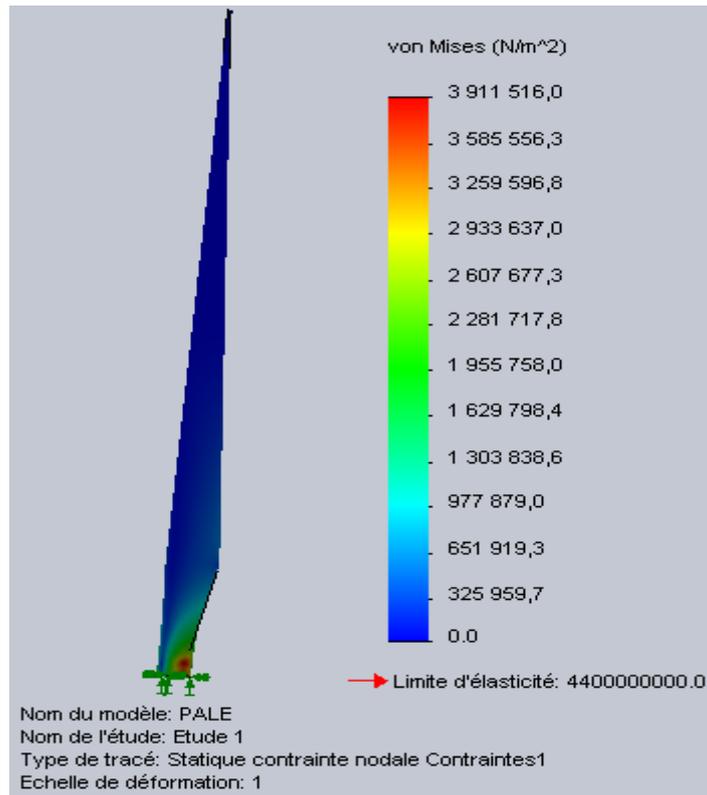


Figure IV.8 : Distribution des contraintes sur la pale.

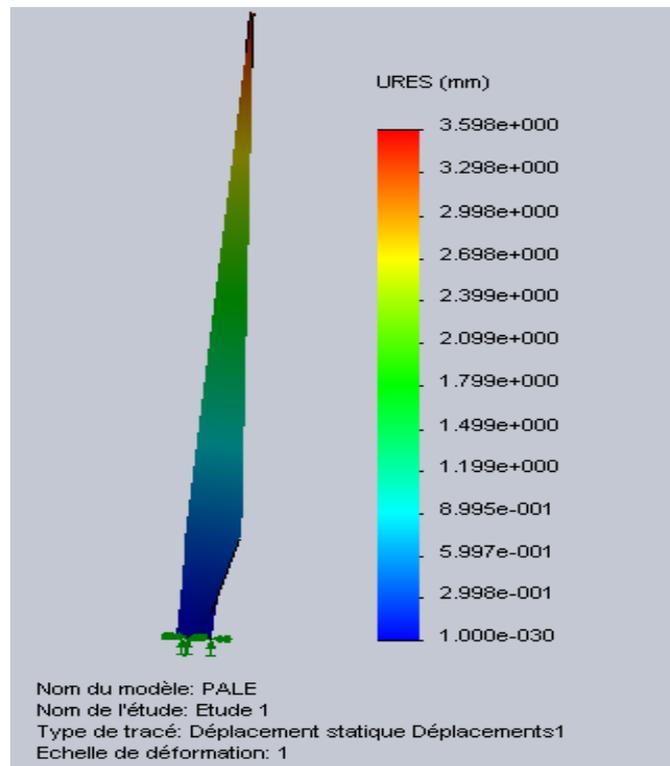


Figure IV.9: Distribution des déplacements sur la pale.

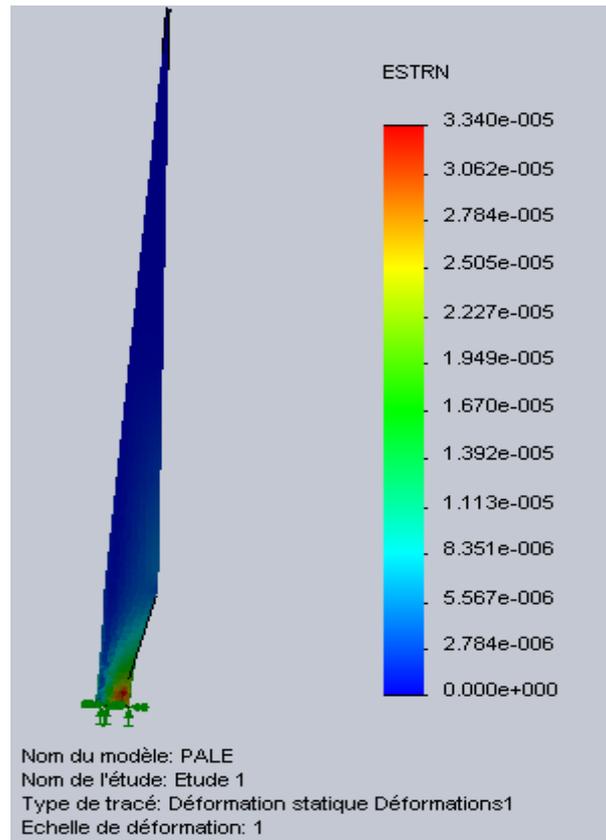


Figure IV.10 : Distribution des contraintes sur la pale.

- ❖ Pour les autres matériaux cités auparavant, on prend le max de chaque simulation pour interpréter les résultats sous forme de tableaux :

Tableau IV.5 : Résultats sur la pale avec une vitesse du vent 30 m/s.

Matériaux composite	Les contraintes max (KN/m ²)	Déplacement max (mm)	Déformations max (10 ⁻⁵ mm)
Type S	3911	3.59	3.34.
Type R	3910	4.23	3.85
Type E	3875	3.49	3.18
Type C	3907	3.81	3.33

D'après les résultats, les contraintes et déplacements ne dépassent pas les limites des matériaux.

IV.2 L'arbre principal

Après le design de l'arbre avec le logiciel Solidworks, on introduit le type de fixation ainsi que les couples calculés précédemment, on néglige l'effet de poids.

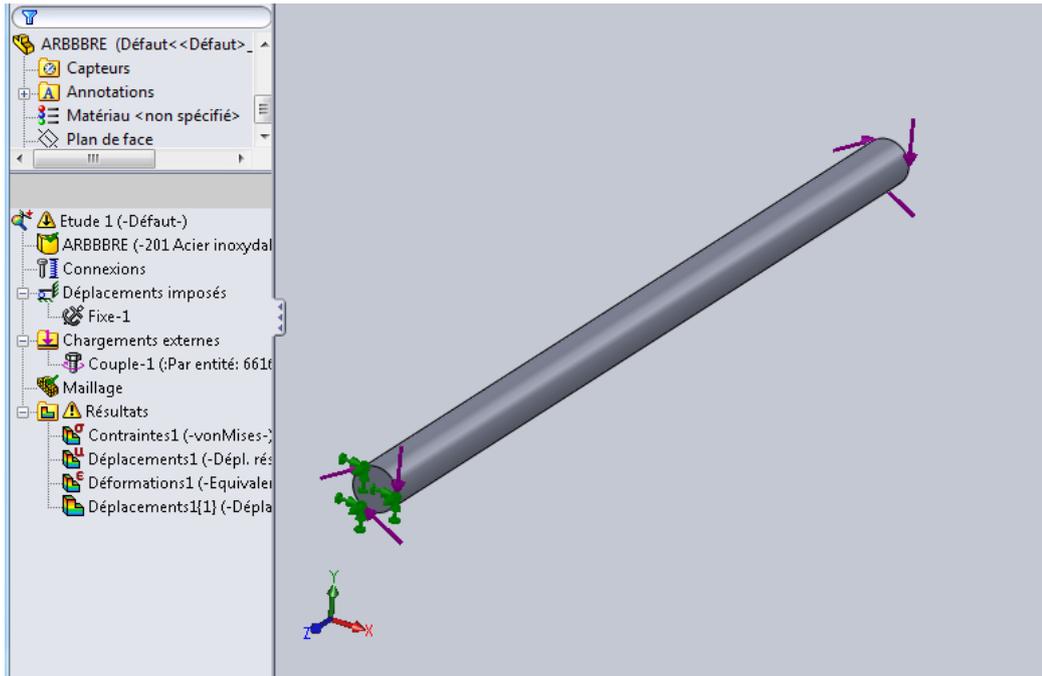


Figure IV.11 : Dessin de l'arbre principal avec les chargements.

- ❖ Pour une vitesse $U=5\text{m/s}$ avec un acier inoxydable recuit, on obtient les résultats suivants :

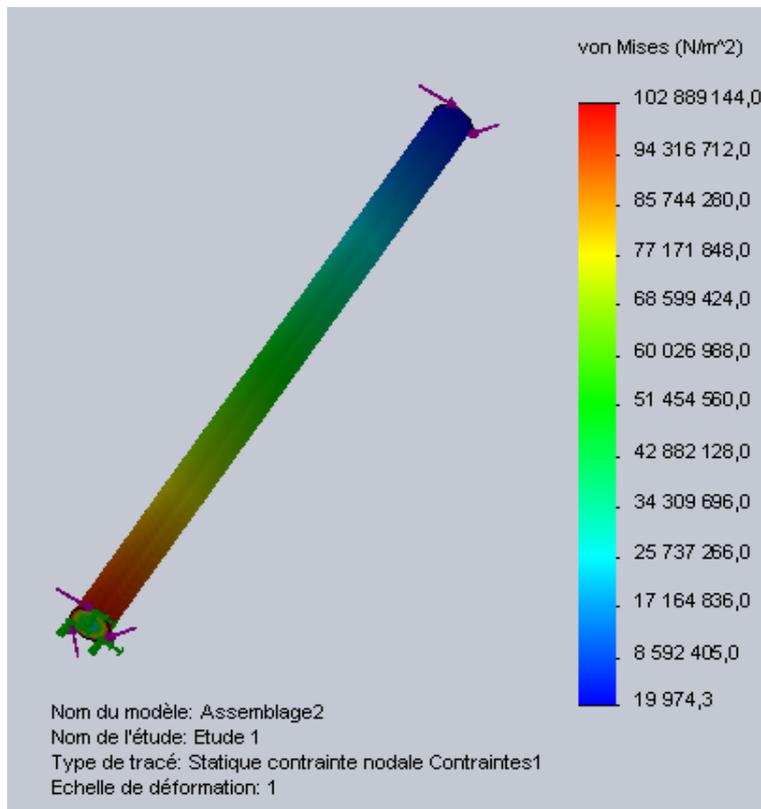


Figure IV.12 : Distribution des contraintes sur l'arbre principal.

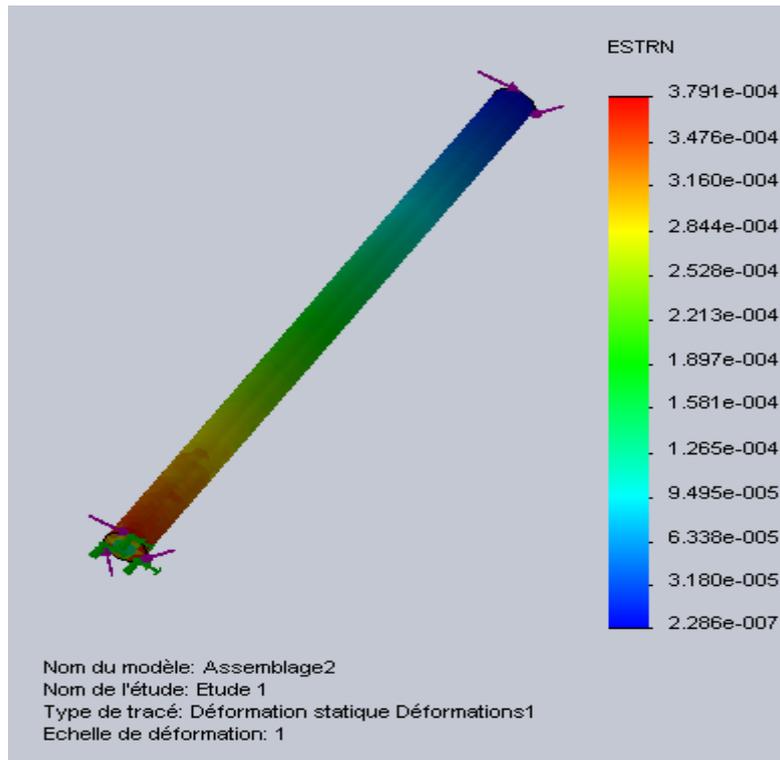


Figure IV.13 : Distribution des déformations sur l'arbre principal.

- ❖ Pour les autres vitesses et matériaux aciers cités dans le chapitre II, on prend le max de chaque simulation pour interpréter les résultats sous forme de tableaux :

Tableau IV.6: Résultats des contraintes maximales sur l'arbre principal en (KN/m²)

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier inoxydable recuit	102889	220793	611971	283501
Barre acier laminée à chaud	102941	220951	611422	282099
Acier étiré à froid	102913	220716	611422	283757
Acier 1035	102821	220635	611422	283248
Acier recuit à 850°C	102883	220749	611509	282279
Acier allié	102758	220596	611135	275121
Acier AsTm A36	102814	221912	612147	287193
Acier non allié moulé	102428	222116	612611	289238

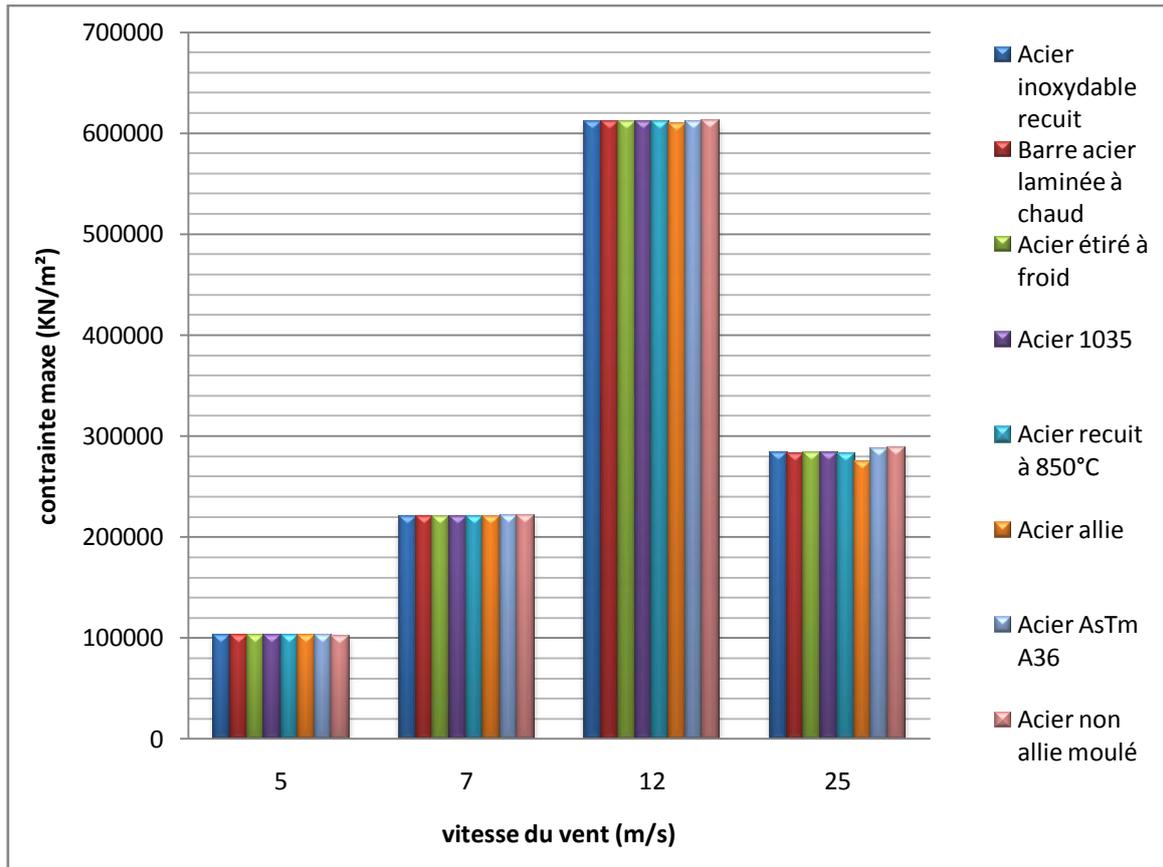


Figure IV.14 : Histogramme des contraintes maximales sur l'arbre principal.

Tableau IV.7: Résultats des déformations maximales sur l'arbre principal en (10^{-4} mm)

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier inoxydable recuit	0,34	1,08	2,57	1,43
Barre acier laminée à chaud	0,39	1,05	2,58	1,45
Acier étiré à froid	0,32	1,09	2,54	1,42
Acier 1035	0,31	1,06	2,54	1,42
Acier recuit à 850°C	0,32	1,09	2,53	1,43
Acier allie	0,30	1,02	2,44	1,36
Acier AsTm A36	0,32	1,09	2,55	1,42
Acier non allie moulé	0,33	1,08	2,52	1,43

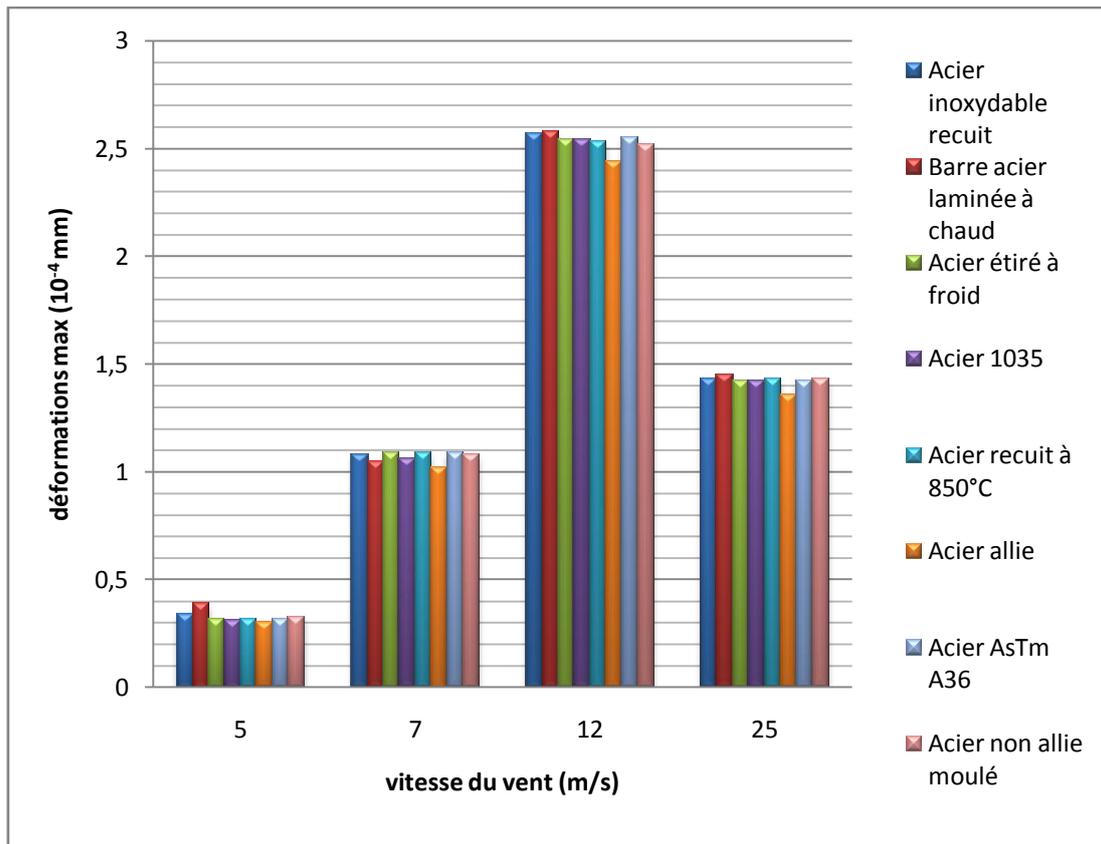


Figure IV.15 : Histogramme des déformations maximales sur l'arbre principal.

Les résultats des simulations sur l'arbre principal démontrent que les contraintes et les déplacements ne dépassent pas les limites des matériaux. On remarque que l'acier allié est le plus adéquat puisque il est moins déformé.

IV.3 La tour

Calcul de différentes forces qui s'exercent sur la tour :

❖ La force du poids de la nacelle : $P_n = 225.630 \text{ KN}$

❖ Calcul la force F

D'après l'équation (III.31) :

$$A=457.655\text{m}$$

D'après l'équation (II.12) on calcul la force du vent qui s'exerce sur la tour :

- Pour une vitesse $U=5 \text{ m/s}$: $F = 7.007 \text{ KN}$
- Pour une vitesse $U=7 \text{ m/s}$: $F = 13.735 \text{ KN}$
- Pour une vitesse $U=12\text{m/s}$: $F = 40.365 \text{ KN}$
- Pour une vitesse $U=25\text{m/s}$: $F = 175.196 \text{ KN}$

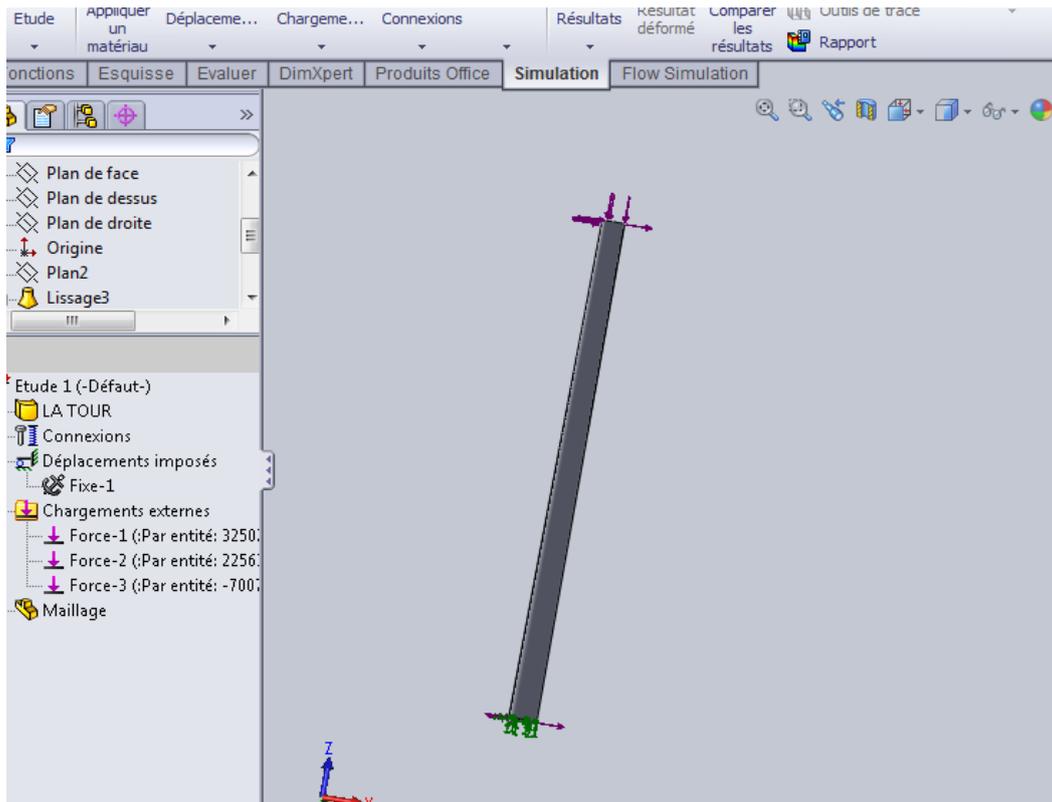


Figure IV.16 : Dessin de la tour avec chargements.

- ❖ Pour une vitesse $U = 5\text{ m/s}$ et avec un acier inoxydable recuit, on obtient les résultats suivants :

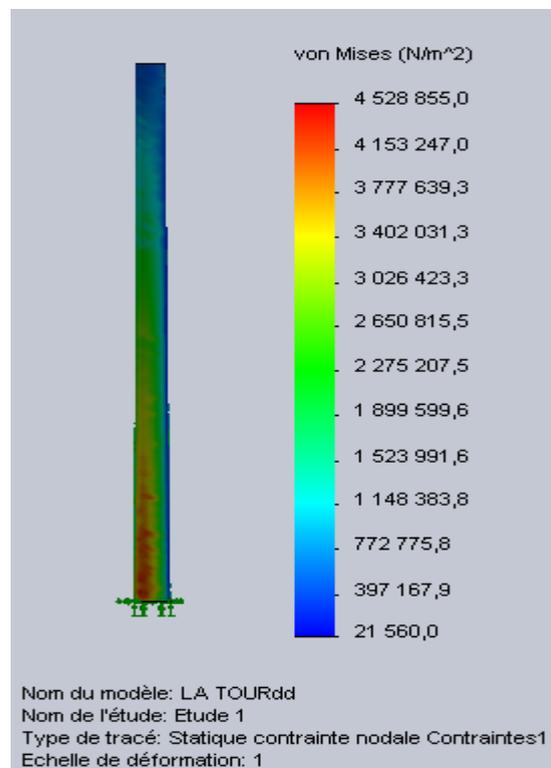


Figure IV.17 : Distribution des contraintes sur la tour.

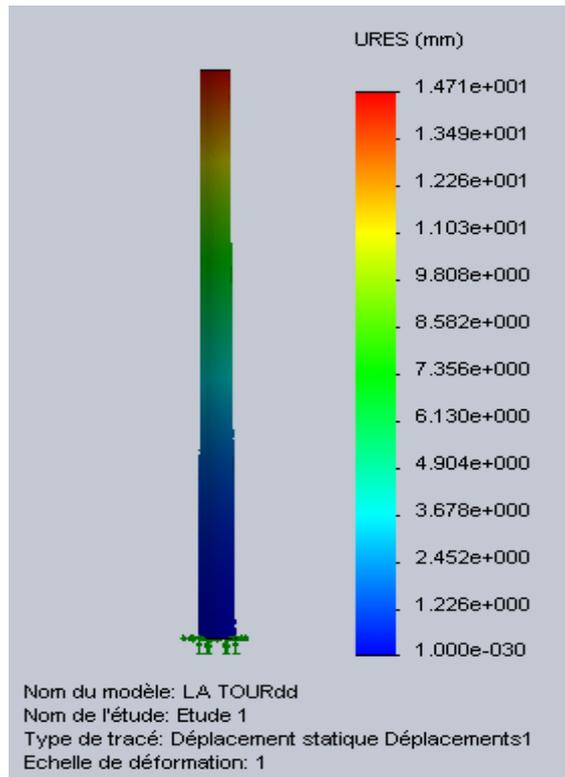


Figure IV.18 : Distribution des déplacements sur la tour.

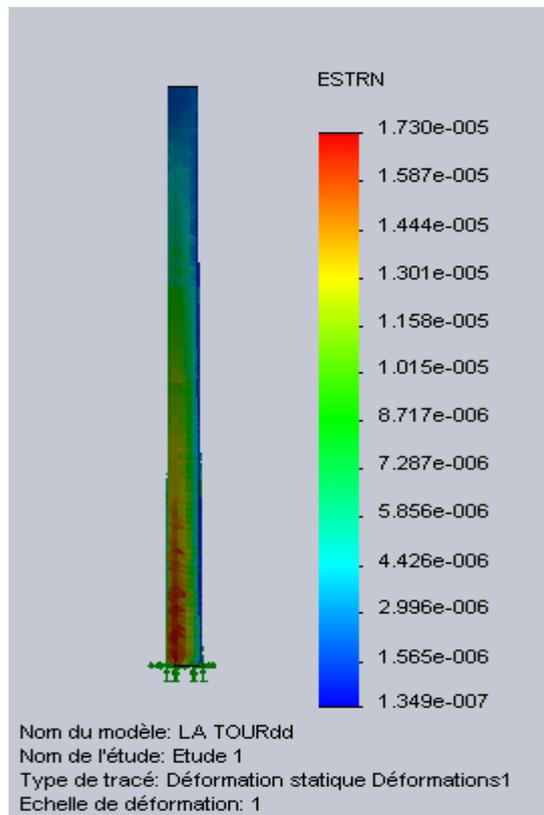


Figure IV.19 : Distribution des déformations sur la tour.

- ❖ Pour les différentes vitesses et les différents matériaux d'aciers, on prend le max de chaque simulation pour interpréter les résultats sous forme de tableaux :

Tableau IV.8 : Résultats des contraintes maximales sur la tour en (KN/m²)

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier inoxydable recuit	4528	8420	17486	19744
Barre acier laminée à chaud	4561	8481	17495	19568
Acier étiré à froid	4541	8472	17472	19683
Acier (ss 1035)	4571	8494	17411	19771
Acier recuit à 850°C	4529	8412	17455	19399
Acier allié	4498	8359	17398	19264
Acier AsTm A36	4530	8481	17484	19759
Acier non allié moulé	4631	8611	17446	19546

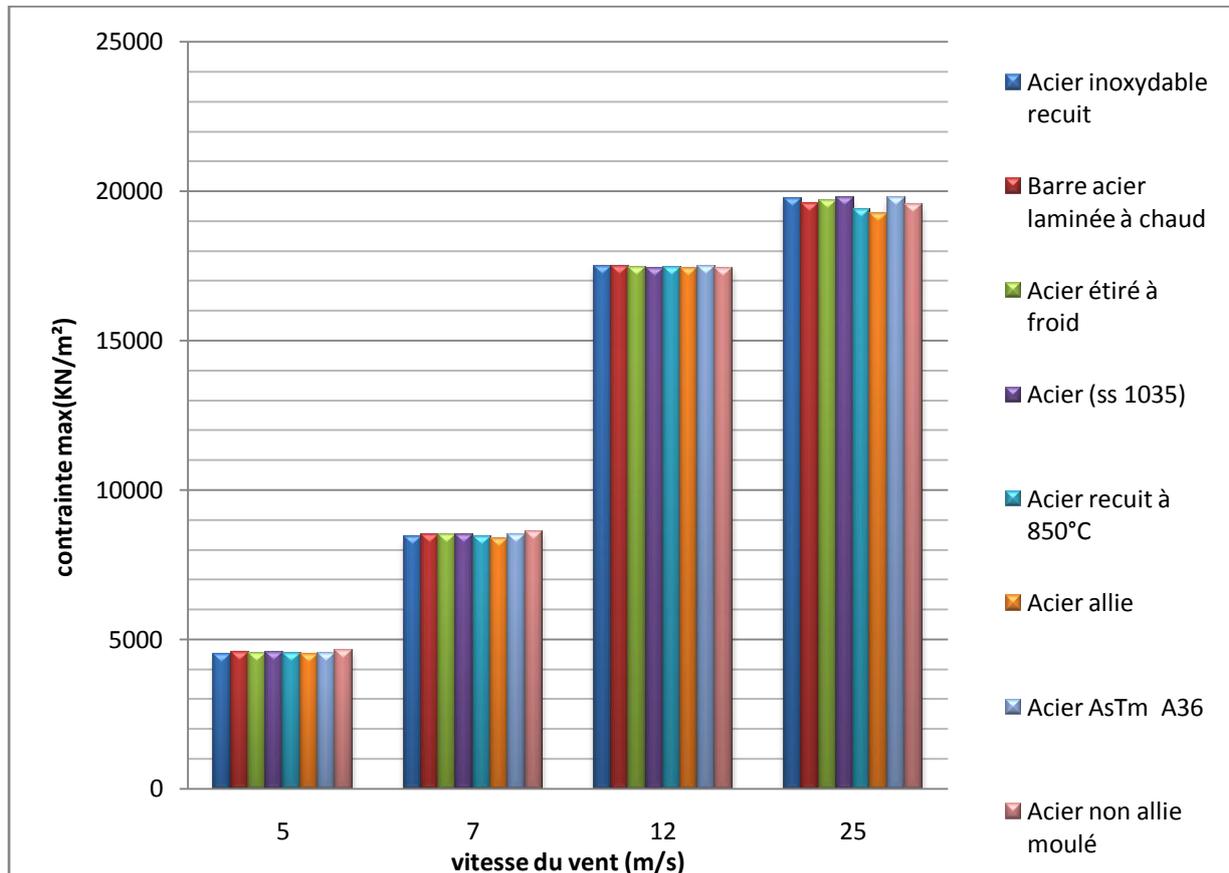


Figure IV.20 : Histogramme des contraintes maximales sur la tour.

Tableau IV.9 : Résultats des déplacements maximaux sur la tour en (mm).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier inoxydable recuit	14.71	36.09	60.81	56.80
Barre acier laminée à chaud	14.55	37.34	60.70	56.60
Acier étiré à froid	14.58	36.42	60.50	56.50
Acier (ss 1035)	14.60	36.44	60.61	56.70
Acier recuit à 850°C	14.29	35.77	60.23	56.10
Acier allie	14.15	35.56	59.50	55.60
Acier AsTm A36	14.36	37.36	60.60	56.70
Acier non allie moulé	14.84	37.31	60.80	56.90

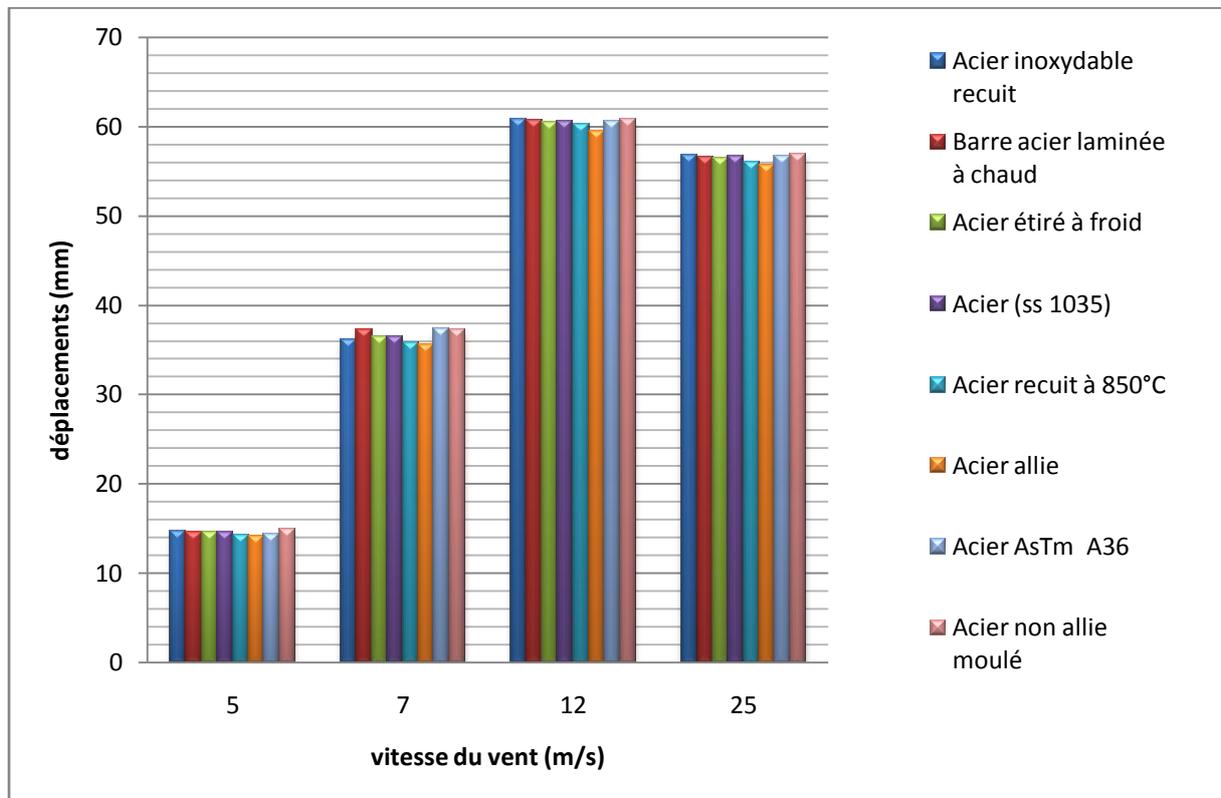


Figure IV.21 : Histogramme des déplacements maximaux sur la tour.

Tableau IV.10 : Résultats des déformations maximales sur la tour en (10^{-5} mm).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier inoxydable recuit	1,730	3,398	6,684	5,296
Barre acier laminée à chaud	1,717	3,418	6,696	5,257
Acier étiré à froid	1,716	3,408	6,690	5,226
Acier (ss 1035)	1,717	3,410	6,672	5,231
Acier recuit à 850°C	1,708	3,406	6,605	5,207
Acier allie	1,679	3,395	6,583	5,190
Acier AsTm A36	1,715	3,488	6,692	5,233
Acier non allie moulé	1,771	3,482	6,748	5,379

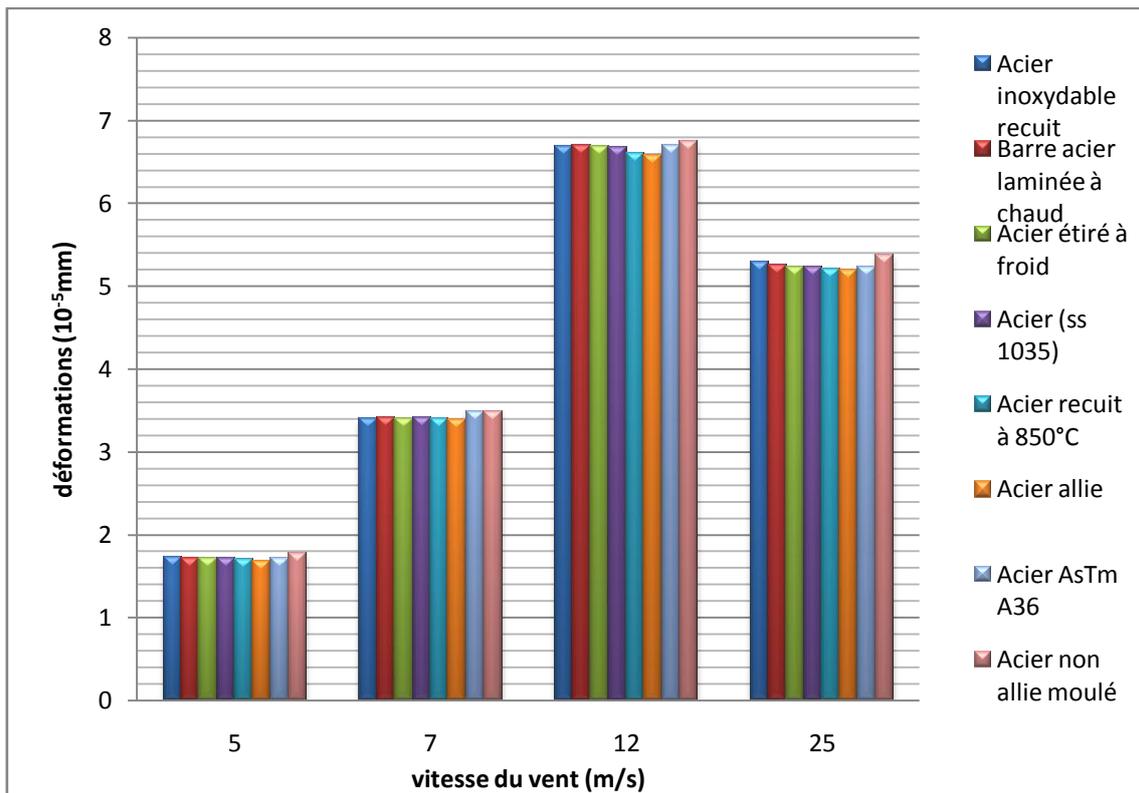


Figure IV.22 : Histogramme des déformations maximales sur la tour.

D'après les résultats, les contraintes maximales se situent au niveau de la partie inférieure de la tour près du sol, par contre les déplacements se situent au sommet de la tour, et dépassent pas les limites des matériaux utilisés.

Après avoir comparé les matériaux, on constate que l'acier allié est le plus adéquat pour la tour.

IV.4 Multiplicateur

Pour la simulation du multiplicateur, on a trouvé un dysfonctionnement de la simulation sur les assemblages, qui est dû à la limitation du nombre des itérations lors de la résolution. Du moment que les forces et le couple sont plus importants à l'entrée, on effectue la simulation élément par élément sur le premier étage.

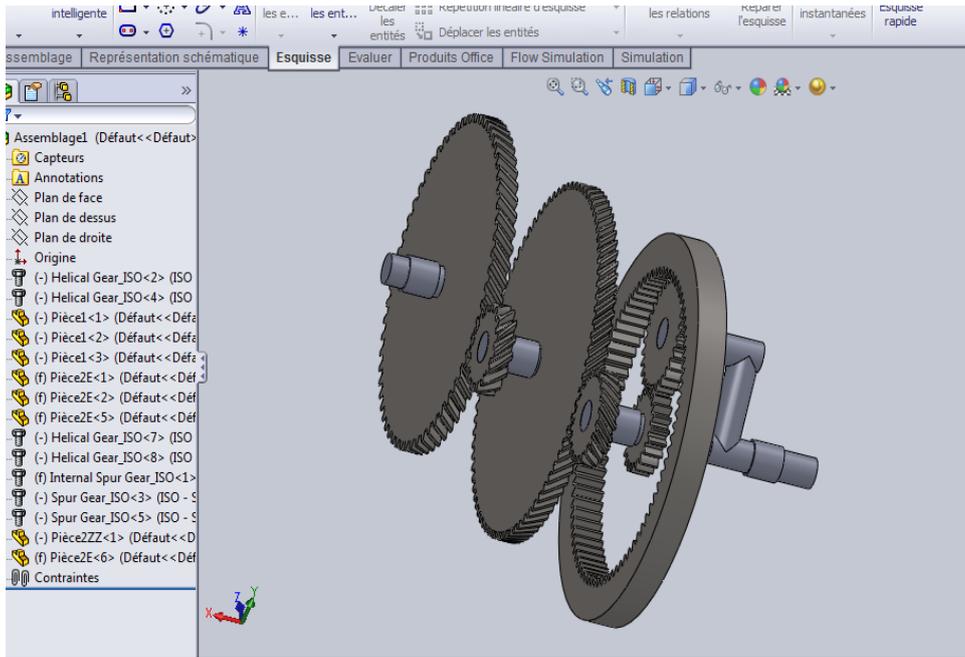


Figure IV.23 : Dessin de multiplicateur.

❖ Etude de premier étage :

✓ Le premier engrenage :

D’après les résultats de couple de résistant, on calcul la force qui s’exerce sur une dent de l’engrenage. On utilise l’équation (III.25) : Avec $D=0.57m$

- Pour une vitesse $U=5$ m/s :

$$C_{aéro} = 91.0855 \text{ KN.m} \implies T = 159.799 \text{ KN}$$

- Pour une vitesse $U=7$ m/s :

$$C_{aéro} = 190,809 \text{ KN.m} \implies T = 334.752 \text{ KN}$$

- Pour une vitesse $U= 12m/s$:

$$C_{aéro} = 429,875 \text{ KN.m} \implies T = 754.166 \text{ KN}$$

- Pour une vitesse $U= 25m/s$:

$$C_{aéro} = 225,477 \text{ KN.m} \implies T = 395.573 \text{ KN}$$

- Pour une vitesse 5m/s, avec le matériau bronze, on obtient les résultats suivants :

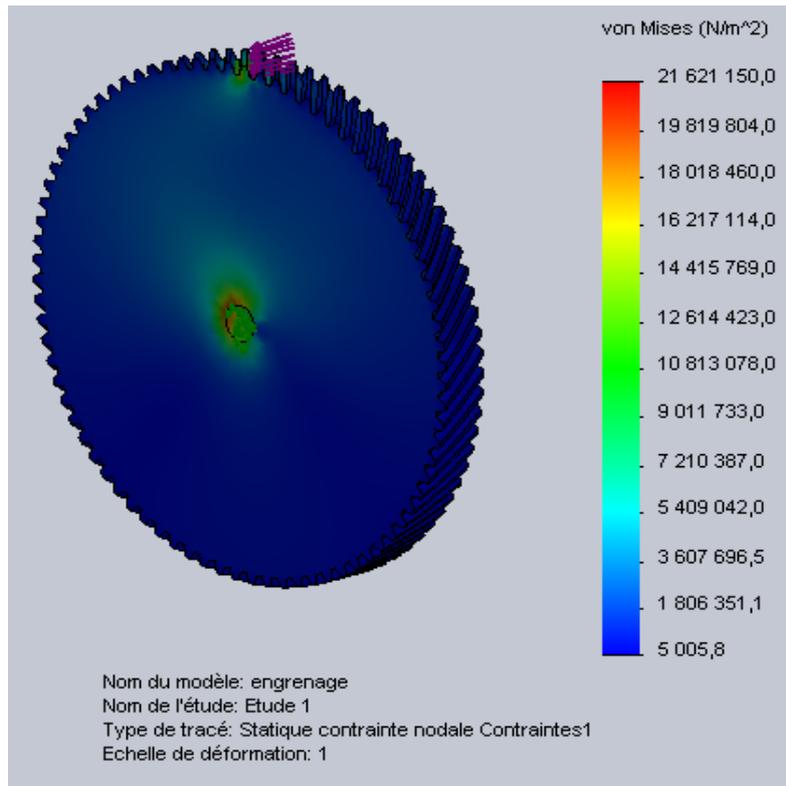


Figure IV.24 : Distribution des contraintes sur le premier engrenage.

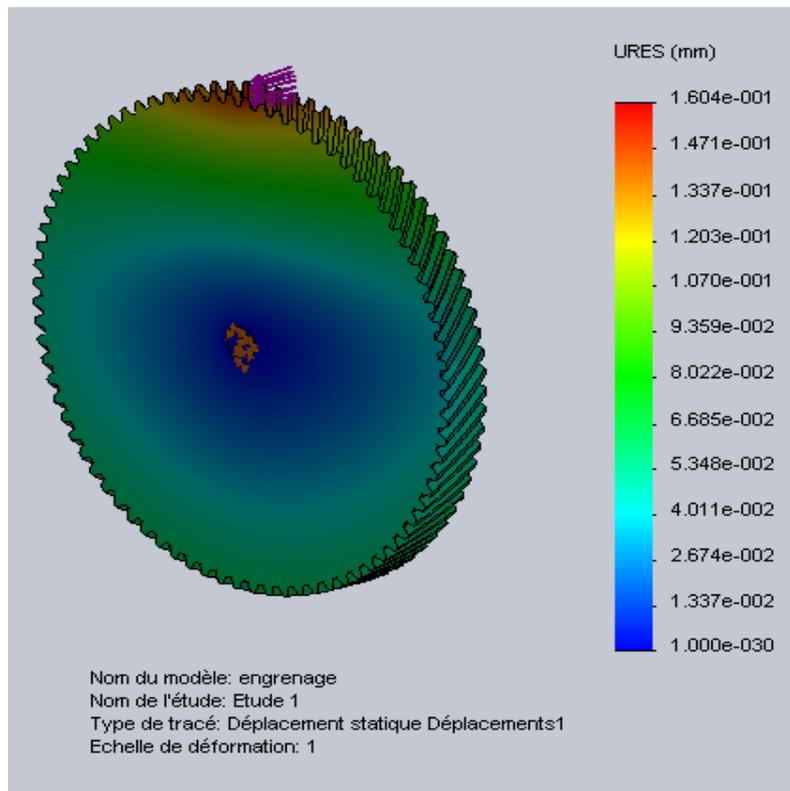


Figure IV.25 : Distribution des déplacements sur le premier engrenage.

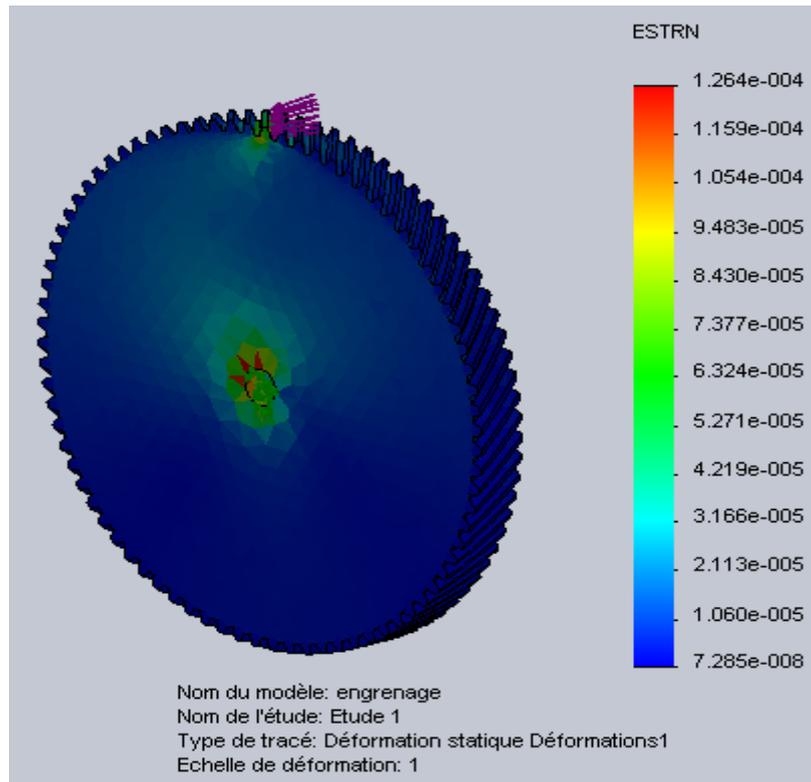


Figure IV.26 : Distribution des déformations sur le premier engrenage.

- Pour les autres vitesses et les autres matériaux, on interprète les résultats sous forme des tableaux suivants :

Tableau IV.11: Résultats des contraintes maximales sur le premier engrenage en (KN/m²).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier allie	22692	81609	195575	89048
Fonte	22080	86486	192994	89778
Bronze	21621	89644	193839	89993

Tableau IV.12: Résultats des déplacements maximaux sur le premier engrenage en (mm).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier allie	0.08	0.45	1.35	0.51
Fonte	0.14	0.47	1.62	0.53
Bronze	0.16	0.49	1.67	0.57

Tableau IV.13: Résultats des déplacements maximaux sur le premier engrenage (10⁻⁴mm).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier allie	0.65	1.19	2.75	1.35
Fonte	1.15	2.11	4.85	2.39
Bronze	1.26	2.31	5.28	2.60

✓ Le deuxième engrenage :

Pour une vitesse 5m/s et avec le matériau bronze, on obtient les résultats suivants :

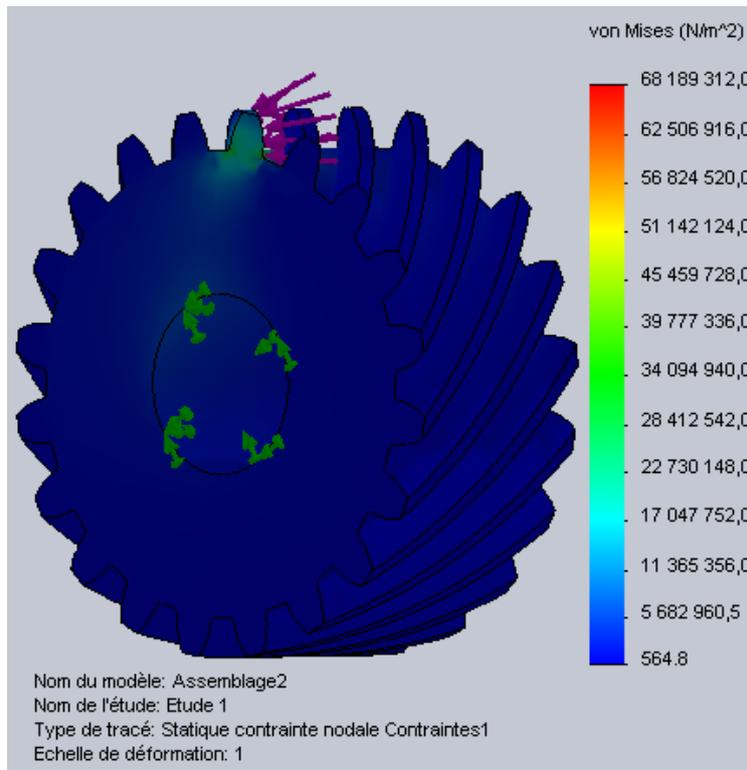


Figure IV.27: Distribution des contraintes sur le deuxième engrenage.

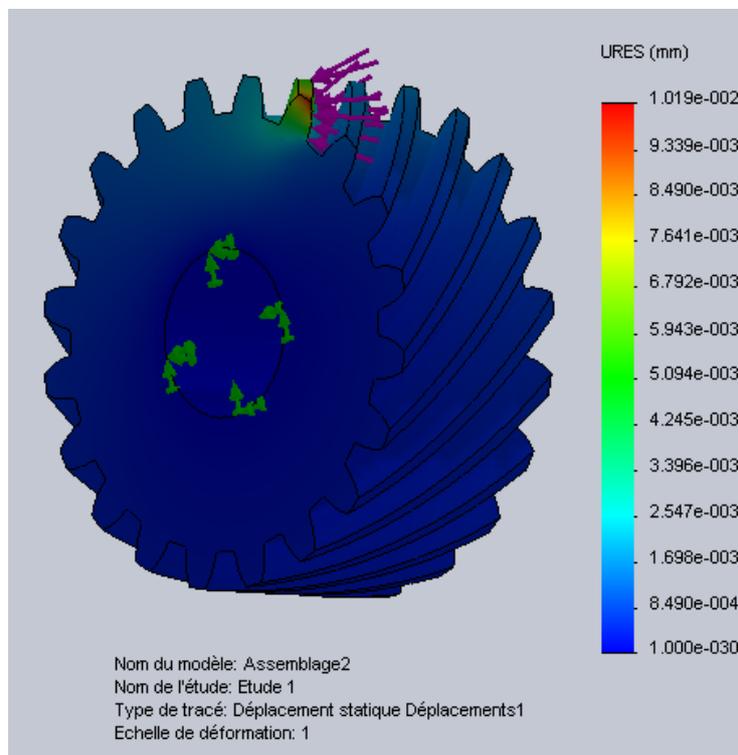


Figure IV.28: Distribution des déplacements sur le deuxième engrenage.

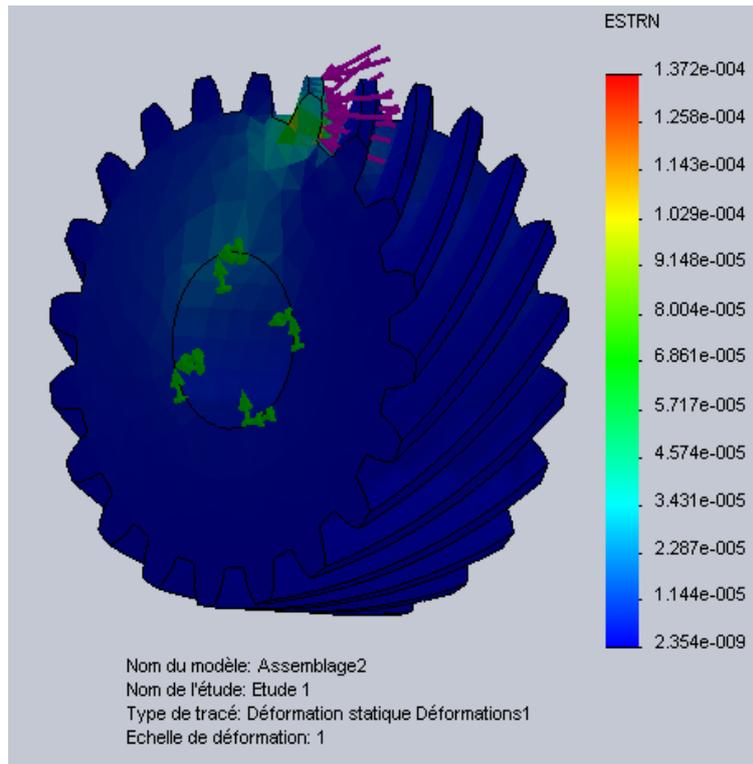


Figure IV.29: Distribution des déformations sur le deuxième engrenage.

❖ Pour les autres vitesses et les autres matériaux, on interprète les résultats sous forme des tableaux suivants :

Tableau IV.14: Résultats des contraintes maximales sur le deuxième engrenage (KN/m²).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier allie	22692	151461	370866	162564
fonte	64842	153357	352666	163605
bronze	65980	156232	358854	165561

Tableau IV.15: Résultats des déplacements maximaux sur le deuxième engrenage en (mm).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier allie	1.01	2.41	5.54	3.13
fonte	1.77	4.20	9.65	5.17
bronze	1.93	4.59	10.05	5.69

Tableau IV.16: Résultats des déformations maximales sur le deuxième engrenage (10⁻⁴mm).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier allie	1.35	3.32	7.64	3.67
fonte	2.41	5.70	10.31	5.03
bronze	2.61	6.22	14.42	5.45

✓ **Arbre de transmission :**

- ❖ Pour une vitesse 12m/s, avec le matériau Acier non allié moulé, on obtient les résultats suivants :

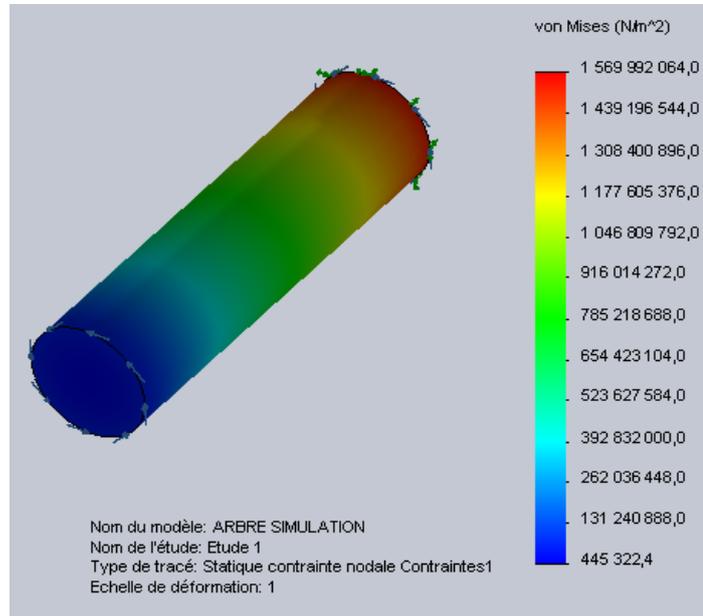


Figure IV.30 : Distribution des contraintes sur l'arbre de transmission.

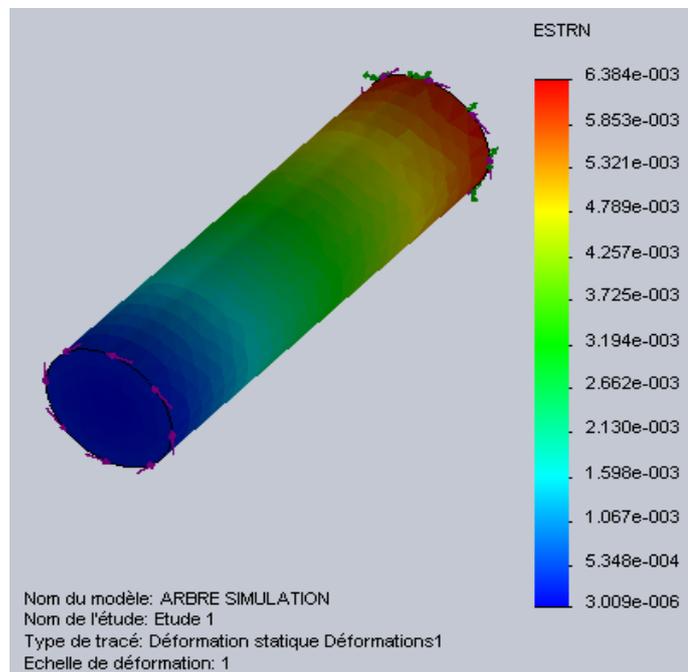


Figure IV.31 : Distribution des déformations sur l'arbre de transmission.

- ❖ Pour les autres vitesses et matériaux, on interprète les résultats sous forme des tableaux suivants :

Tableau IV.17 : Résultats des contraintes maximales sur l'arbre de transmission en (KN/m²).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier non allié moulé	288672	683526	1569992	773650
Acier allie	288648	683469	1569859	773540
Acier recuit à 850°C	288659	683494	1569918	773570

Tableau IV.18: Résultats des déformations maximales sur arbre de transmission en (10⁻³mm).

Matériaux	U=5m/s	U=7m/s	U=12m/s	U=25m/s
Acier non allié moulé	0.11	0.27	0.63	0.44
Acier allie	0.10	0.25	0.58	0.42
Acier recuit à 850°C	0.11	0.26	0.60	0.49

D'après les résultats de la simulation du premier étage, les contraintes maximales se situent au niveau de la partie inférieure de la dent. Les déplacements se situent au sommet de la dent, et ne dépassent pas les limites des matériaux utilisés.

Après avoir comparé les matériaux, on constate que l'acier allie est le plus adéquat pour le multiplicateur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de cette étude consiste à développer un modèle d'analyse, d'étude de la résistance des matériaux des éléments principaux d'une éolienne qui est destinée à opérer dans un climat saharien; Pour cela, nous avons suivi un modèle analytique et numérique pour simuler le comportement mécanique de l'éolienne et la détermination de l'état des contraintes, des déplacements et des déformations de ses éléments, en utilisant un logiciel de simulation (solidworks).

Première étape : consistait à fournir toutes les caractéristiques structurelles de l'éolienne, et le fonctionnement de chaque élément, ensuite on a entamé l'étude aérodynamique qui nous a permis de déterminer toutes les forces qui s'exercent sur l'éolienne, la vitesse de rotation, le couple aérodynamique, et le couple utile, pour différentes vitesses du vent.

Deuxième étape : l'étude a été consacrée aux calculs de résistance des matériaux et l'étude technologique de tous les organes constitutifs, afin d'entamer la résolution par la simulation solidworks.

A partir de là, on a déterminé les distributions des contraintes, des déplacements, et des déformations des éléments principaux étudiés. Cela nous a permis de vérifier l'état de la structure et de trouver les matériaux adéquats. Les résultats auxquels nous sommes parvenus ont démontrés la fiabilité et les bonnes performances de la structure de notre éolienne, dans un climat saharien.

Comme perspectives des travaux futurs, le développement d'une analyse globale et complète est suggéré pour étudier les autres modes de déformations et des vibrations des structures d'une part, et d'autre part calculer la durée de vie de chaque élément de la structure.

V Bibliographie:

- [1] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [2] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994, p. 500-505.
- [3] Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique Mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14.
- [4] O'Connor M, Gallopin G-C., Funtowicz S., Ravetz J, « La science pour le XXIe siècle : du contrat social aux fondements scientifiques », revue internationale des sciences sociales, N°168, juin 2001.
- [5] Gabriel-Octavian Cimuca, « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens », thèse doctorat, E.N.S.A.M, centre de Lille, 2005.
- [6] Communication à l'académie des technologies pour un progrès raisonné de Bernard Tardieu ;« Rapport énergie hydraulique éolienne », novembre 2005.
- [7] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [8] Technique de l'ingénieur D 3 960. Jean-Louis COUDERT Ingénieur des Hautes Études Industrielles (HEI). Ingénieur au Service Études Machines Tournantes 2002.
- [9] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [10] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.
- [11] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, December 2001.

BIBLIOGRAPHIE

- [12] L. Moreau, « Modélisation conception et commande de génératrice à réductance variable basse vitesse », thèse de doctorat, de l'université de Nantes, le 9 décembre, 2005.
- [13] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis,november 5-8, 1998.
- [14] http://www.thewindpower.net/turbine_fr_42_gamesa_g52-850.php,27 avril 2012.
- [15] M.JOURIEH- Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne à fin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.20décembre2007
- [16] J.FMANWELL, J.G Mc GOAN, A.LROGERS wind energy explained -theory, design And application, Amherst, USA
- [17] A.ILINCA- L'aérodynamique de la turbine éolienne et ses composantes mécaniques- laboratoire de recherche en énergie éolienne LREE-université du Québec à Rimouski-22-25 octobre2007
- [18] G. HENRIOT : Traité théorique et pratique des engrenages. tome 1, Dunod, 1979. France
- [19]F. ESNAULT : Construction mécanique, Transmission de puissance. tome 1 : principe. Dunod 1994. Paris, France.
- [20] Aleinik L et Durler J . Résistance des matériaux cours de base, édition bibliothèque de l'ingénieur 1973.
- [21] www.KTR.com 12 mai 2012, 10h

VI Annexe

Annexe 1 : récapitulatif des valeurs des coefficients E, X, Y, X₀ et Y₀ en fonction du type de roulement

Tableau I : Coefficients e, X, Y, X₀ et Y₀									
type de roulement	e	F _a /F _r ≤ e		F _a /F _r > e		X ₀	Y ₀		
		X	Y	X	Y				
A billes à contact radial à une ou deux rangées	dépend du rapport F _a /C ₀	1	0	0,56	dépend de F _a /C ₀	0,6	0,5		
A billes à contact oblique	à une rangée	1,14	0	0,35	0,57	0,5	0,26		
	à deux rangées	0,86	0,73	0,62	1,17	1	0,63		
A rotule sur billes	voir catalogue	1	voir catalogue	0,65	voir catalogue	1	voir catalogue		
A rotule sur rouleaux	voir catalogue	1	voir catalogue	0,67	voir catalogue	1	voir catalogue		
A rouleaux coniques	voir catalogue	1	0	0,4	voir catalogue	0,5	voir catalogue		
Butée à rotule sur rouleaux	—	—	si F _r /F _a ≤ 0,55				2,7	1	
			1,2	1					

Annexe 2 : valeur du coefficient de sécurité statique s₀

Mode de fonctionnement	Tableau II : Valeurs du coefficient de sécurité statique s₀						Roulement à l'arrêt	
	Roulements en rotation							
	Exigences de fonctionnement							
	faibles		Normales		élevées			
Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	Roulements à billes	Roulements à rouleaux	
Régulier sans vibrations	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normal	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Chocs prononcés	≥1,5	≥2,5	≥1,5	≥3	≥2	≥4	≥1	≥2

Annexe 3 : les données techniques des accouplements Rotox

ROTEX® Aluminium moulé (Al-D)																	
Taille	Compo- sant	Anneau (pièce 2) 1			Alésage fini d (min-max)	Dimensions (mm)										Vis de fixation 2	
		Couple nominal [Nm]				Généralités											
		92 Sh A	98 Sh A	64 Sh D		L	l ₁ :l ₂	E	b	s	D _H	d _H	D; D ₁	N	G	t	T _A [Nm]
14 ¹⁾	1a	7,5	12,5	-	6-16	35	11	13	10	1,5	30	10	30	-	M4	5	1,5
	1				6-19								32	20	M5	10	2
19	1a	10	17	-	19-24	66	25	16	12	2	41	18	41				
	1				9-24	78	30	18	14	2	56	27	40	24	M5	10	2
24	1a	35	60	-	22-28								56				
	1				10-28	90	35	20	15	2,5	66	30	48	28	M8	15	10
28	1a	95	160	-	28-38								66				
	1																
ROTEX® Fonte grise EN-GJL-250 (GG 25)																	
38	1				12-40								66				
	1a	190	325	405	38-48	114	45	24	18	3	80	38	78	37	M8	15	10
42	1b				12-48	164	70						75	40			
	1				14-45	126	50						94	65			
48	1a	265	450	560	42-55			26	20	3	95	46	94	65	M8	20	10
	1b				14-55	176	75						85	45			
55	1				15-52	140	56						104	69			
	1a	310	525	655	48-62	188	80	28	21	3,5	105	51	104	69	M8	20	10
65	1b				15-62	188	80						98	52			
	1				20-60	160	65	30	22	4	120	60	118	61	M10	20	17
75	1a	410	685	825	55-74								120	-			
	1b				20-74	210	90						115	61			
90	1				22-70								135	-			
	1a	625	940	1175	65-80	185	75	35	26	4,5	135	68	135	-	M10	20	17
90	1b				22-80	235	100						135	69			
	1				30-80								160	-			
90	1a	1280	1920	2400	75-95	210	85	40	30	5	160	80	160	-	M10	25	17
	1b				30-95	260	110						160	-			
90	1				40-97								160	81			
	1a	2400	3600	4500	90-110	245	100	45	34	5,5	200	100	200	-	M12	30	40

Annexe 4 : puissance nominale d'une génératrice asynchrone

P _N (kW)	Moteurs version protégée								Moteurs version fermée							
	Fréquence de rotation [tr/min]															
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	η [%]				cos φ				η [%]				cos φ			
0,6	-	74	-	-	-	0,76	-	-	-	74,0	-	-	-	0,76	-	-
1,0	79,0	78,5	77,0	-	0,86	0,79	0,72	-	79,0	78,5	77,0	-	0,86	0,79	0,72	-
1,7	81,5	81,5	79,5	-	0,87	0,82	0,75	-	81,5	81,5	79,5	-	0,87	0,82	0,75	-
2,8	84,0	83,5	82,5	-	0,88	0,84	0,78	-	84,0	83,5	82,5	-	0,88	0,84	0,78	-
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,80	0,76	85,5	85,5	84,5	84,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78	87,5	87,0	86,0	86,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80	87,5	87,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81	88,0	88,5	88,0	87,5	0,90	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82	88,5	89,0	88,5	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83	89,5	90,0	89,0	89,0	0,91	0,88	0,86	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84	89,5	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,87	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84	90,0	91,0	91,0	91,0	0,92	0,89	0,88	0,84
75	91,0	91,5	92,0	-	0,91	0,89	0,88	-	90,5	91,5	92,0	-	0,92	0,90	0,89	-
100	91,5	92,0	-	-	0,92	0,89	-	-	91,0	92,0	-	-	0,92	0,90	-	-

ANNEXE

ANNEXE5 : Propriétés des matériaux :

matériaux	Module d'élasticité N/m ²	Coefficients de poisson S O	Limite de traction N/m ²	Limite d'élasticité N/m ²	Module de cisaillement N/m ²
Acier inoxydable recuit	2.07 10 ¹¹	0.27	0.685 10 ⁹	0.292 10 ⁹	8 10 ¹⁰
Barre acier laminée à chaud	2 10 ¹¹	0.29	0.325 10 ⁹	0.180 10 ⁹	8 10 ¹⁰
Acier étiré à froid	2.05 10 ¹¹	0.28	0.385 10 ⁹	0.325 10 ⁹	8 10 ¹⁰
Acier (1035)	2.049 10 ¹¹	0.29	0.585 10 ⁹	0.282 10 ⁹	7.99 10 ¹⁰
Acier recuit à 850°C	2.05 10 ¹¹	0.285	0.560 10 ⁹	0.46 10 ⁹	8 10 ¹⁰
Acier allie	2.1 10 ¹¹	0.28	0.723 10 ⁹	0.620 10 ⁹	8 10 ¹⁰
Acier AsTm A36	2 10 ¹¹	0.26	0.4 10 ⁹	0.250 10 ⁹	7.93 10 ¹⁰
Acier non allie moulé	2 10 ¹¹	0.32	0.482 10 ⁹	0.246 10 ⁹	7.6 10 ¹⁰
Fonte	1.2 10 ¹¹	0.31	0.861 10 ⁹	0.551 10 ⁹	7.7 10 ¹⁰
Bronze	1.1 10 ¹¹	0.3	0.551 10 ⁹	0.275 10 ⁹	4.3 10 ¹⁰

Annexe6 : dessin technique de l'éolienne

