



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
NEZLI Zine Eddine

Le : mardi 9 juillet 2019

Optimisation dimensionnelle d'une pale éolienne battante avec prise en compte du phénomène de pertes

Jury :

Dr.	GUERIRA Belhi	MCB	Université de Biskra	Président
Dr.	DERFOUF Semcheddine	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	ALIOUALI Abde Elwahed	MCA	Université de Biskra	Examineur

Remerciement

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Je voudrais dans un premier temps remercier, mon Directeur de mémoire **Pr Semcheddine Derfouf** et **Dr Mohamed Debbache**, professeur des universités à l'université **Mohamed Khider, Biskra**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Dédicace

Nous tenons à dédier ce modeste travail à :

À nos parents

À nos frères

À nos sœurs

À nos familles

À tous nos enseignants

À tous nos amis et nos collègues

À tous qui nous ont donné de l'aide un jour

*Nous tenons aussi à rendre hommage à tous nos chers décédés que dieu
les bénisse.*

Table des matières

Introduction Générale.....	5
CHAPITRE I GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS.....	7
I.1. Historique.....	8
I.2. Généralité sur les éoliennes.....	9
I.2.1. Définition d'une éolienne.....	9
I.2.2. Les types des éoliennes.....	9
I.2.3. Eolienne à axe horizontal.....	10
I.2.4. Éolien à l'axe vertical.....	11
I.3. Approche mondiale d'énergie éolienne.....	12
I.3.1. L'éolien dans le monde.....	12
Avantages et Inconvénients des Eoliens.....	12
I.3.2. Aux USA et en Chine.....	13
I.3.3. En Europe.....	14
I.3.4. En Asie et en Afrique.....	15
I.4. Potentiel éolien en Algérie.....	15
I.4.1. Bref aperçu sur l'histoire d'énergie éolienne en Algérie.....	15
I.4.2. Le vent en Algérie.....	16
CHAPITRE II FONCTIONNEMENT DE L'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL.....	17
II. 1. Introduction.....	18
II.2. Définition d'une éolienne à axe horizontale.....	18
II.3. Les composants d'une éolienne à axe horizontal.....	18
II.3.1. Le mât.....	19
II.3.2. La nacelle.....	19
II.3.3. Les fondations.....	20
II.4. Principe de fonctionnement.....	21
II.5. Contrôle des éoliennes.....	21
II.5.1. Régulation et freinage par basculement de l'éolienne.....	21
II.5.2. Régulation et freinage par gouvernail articulé.....	21
II.5.3. Système de Régulation aérodynamique.....	22
CHAPITRE III ETUDE AERODYNAMIQUE D'UNE PALE D'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL.....	24
III. 1.Introduction.....	25
III.2. Théorie de Betz.....	25
III.2.1. Définition de l'action du moteur éolien sur l'air.....	26
III.2.2. Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien.....	27
III.2.3. La puissance maximale absorbée par le moteur éolien.....	27

III.3. Théorie de dynamique d'élément de pale (Gluaert) :.....	28
III.3.1. Détermination de la vitesse induite et de la vitesse relative	29
III.3.2. Détermination de la poussé axiale et du moment moteur.....	32
III.3.3. Détermination de la puissance utile et du coefficient de puissance	33
CHAPITRE IV LES CHARGES AÉRODYNAMIQUES SUR UNE PALE ÉOLIENNE.....	36
IV. 1. Introduction.....	37
IV.2. L'effet de la force de poussé axile :.....	37
IV.3. L'effet de la force centrifuge :.....	38
IV.4. Effets des charges gyroscopiques :	39
CHAPITRE V DETERMINATION LA MEILLEURE FORME DE PALE EOLIENNE	42
V. 1. Structure de la pale	43
V.2. Matériaux composites :	43
V.3. Etude Performance structurale de la pale :	45
V.3.1. Méthode d'étude :	46
V.3.2. Outils de calcule (Qblade) :	47
V.3.3. Résultats et discussions :	47
CONCLUSION GENERALE	62
Références Bibliographiques.....	64
Résumé.....	67
ملخص.....	67
Abstract	67

Table des figures

Figure 1 : Eolienne de Charles. F. Brush (Etats-Unis, 1888).	9
Figure 2: Les différents types d'éoliennes.....	10
Figure 3: Eolienne à axe horizontal.....	10
Figure 4: Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.....	11
Figure 5: Éolienne types Savonius. Figure 6: Éolienne de type Darrieus.	11
Figure 7: Classement les anergies éoliennes dans le monde.	13
Figure 8: Capacité éolienne installé dans le monde.	14
Figure 9: Développement d'énergie éolienne dans le monde.....	15
Figure 10: Eolienne de 100 kW de Grand Vent	16
Figure 11 : Schéma d'une éolienne tripale.	19
Figure 12 : Structure d'une nacelle d'éolienne à axe horizontale.	19

Figure 13 :la fondation l'éolienne.	20
Figure 14 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	21
Figure 15 : Plages d'exploitation d'une turbine éolienne (axe horizontal) en fonction de la vitesse du vent.	23
Figure 16:Veine de fluide traverse l'éolienne.	26
Figure 17 : Système tourbillonnaire. Figure 18:Modèle électrique équivalent.	29
Figure 19:Champ magnétique crée autour d'un fil.....	30
Figure 20 : Champ magnétique crée par un solénoïde.	30
Figure 21 : Vitesses induites (théorie de Glauert).	32
Figure 22 : Diagramme de charge triangulaire de la pale.....	38
Figure 23 :Effet gyroscopique sur élément de pale.	39
Figure 24 : La structure de la pale.	43
Figure 25 : Les types de matrice du matériau composite.	43
Figure 26 :Les types de renforts du matériau composite.....	44
Figure 27 : Les structure de stratifié du matériau composite.	44
Figure 28 : La structure sandwich du matériau composite.....	45
Figure 29 : La structure de tissu du matériau composite.....	45
Figure 30 :La position d'étude.	46
Figure 31 :L'interface de Qblade.....	47
Figure 32 : La distribution de la corde et l'angle de calage	48
Figure 33 : La variation du coefficient de puissance.....	49
Figure 34 : La variation de la puissance.	49
Figure 35 : La variation de la force normale.	50
Figure 36 : La variation de la force tangentielle.....	50
Figure 37 : Les distributions d'épaisseurs de la nervure proposées.	51
Figure 38 : Les distributions d'épaisseurs des coques proposées.....	51
Figure 39: Les distributions des contraintes des modèles (c3nX) a 16m/s.	52
Figure 40 :Les distributions des contraintes des modèles (c2nX) à 16m/s.	53
Figure 41 :Les distributions des contraintes des modèles (c1nX) a 16m/s.	53
Figure 42 : Les distributions des contraintes des modèles (c3nX) à 3m/s.	54
Figure 43 :Les distributions des contraintes des modèles (c1nX) à 3m/s.	54
Figure 44 : Les distributions des contraintes des modèles (c1nX) a 3m/s.	55
Figure 45 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c1nX) a 16m/s.....	56
Figure 46 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c2nX) a 16m/s.....	57
Figure 47 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c3nX) a 16m/s.....	58

Figure 48 :La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c1nX) a 3m/s.....	59
Figure 49 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c2nX) a 3m/s.....	60
Figure 50 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c3nX) a 3m/s.....	60

Liste de tableaux

Tableaux.1. Les modèles d'étude.....	46
Tableaux. 2. Les poids des modèles de pale (kg).....	61

Introduction Générale

Le développement perpétuel de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets salissants associés, principalement provoqué par la calcination des énergies fossiles, sont au cœur de l'équivoque du la croissance permanent et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète. Aujourd'hui le monde entier commence à prendre conscience de l'importance des énergies renouvelables qui sont devenues une priorité pour l'avenir, parce qu'elles sont des énergies propres, inépuisables et disponibles tout le temps. Elles offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources.

L'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse sont les origines d'énergies renouvelables connues de nos jours. Parmi celles-ci l'énergie éolienne générée par les vents natifs de fracas provoquées par le radoucissement (inégal) de l'atmosphère par la chaleur solaire. Aujourd'hui la majorité des éoliens sont des grandes doctrines industrielles de production d'énergie, ils constituent des parcs connectés en réseau qui produisent directement de l'électricité à partir du vent. Par contre il y a des petits systèmes de production bien qu'ils ont une viabilité clairement plus faible que l'éolien industriel mais elles évoquent l'un des secteurs les plus dynamiques [1].

L'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables qui a actuellement une attirance et un intérêt graduel, elle consiste à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ensuite en une énergie électrique. Cette transformation utilise des pales et un moteur électrique qui se présente sous forme de turbine formée par un ensemble d'éléments. A ce niveau aussi on note que le développement dans l'utilisation de cette énergie dépend de l'évolution des techniques de construction des aéromoteurs et de leurs performances, et spécifiquement de la conception de pales d'éoliennes.[2]

L'Algérie possède un gisement éolien important, principalement sur une bande côtière d'une centaine de kilomètres de larges. Cependant, en se plaçant à une hauteur suffisamment importante on retrouve un gisement intérieur aussi élevé que sur les rivages à une hauteur bien moindre.[3]

Ce travail présente une démarche de d'étude de dimensionnement d'une pale éolienne pour un éolien à axe horizontal. Cette étude vise à définir la forme optimale de pale éolienne adoptée au site d'installation. Le travail commence par une généralité sur l'énergie éolienne présenté dans le premier chapitre. Une explication du fonctionnement des éoliens à axe horizontal a été présenté dans le deuxième chapitre. Pour définir les paramètres de performance et de conception, le troisième chapitre présente une modélisation d'aérodynamique bien détaillé de fonctionnement des éolien à axe horizontal. Dans Le quatrième chapitre, Nous donnons les déférentes charges agissantes sur la pale éolienne pour définir les paramètres de performance structurale de la pale sachant que la distribution d'épaisseur et la résistance de la pale. Le dernier chapitre présente un cas d'études d'un éolien d'avec une pale de 7.5m destiné pour l'installer à la zone de Biskra ou la vitesse moyenne est égal à 4m/s.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I.1. Historique

Il y a bien des années, que les êtres humains ont compris l'intérêt de l'utilisation du vent. C'est pour cela qu'ainsi que cette source d'énergie renouvelable a été utilisée dans différentes fonctions. La première utilisation connue remonte à l'Antiquité avec les galères, qui sont des bateaux à voile. Plus tard, vers l'an 600, on a commencé à utiliser des moulins à vent, qui produisent de l'énergie Mécanique à partir du vent. Les moulins à vent sont les ancêtres des éoliennes. Veut dire qu'au lieu de presser des grains de blé, les éoliennes modernes servent à produire de l'énergie électrique.[4]

Au fil du temps, des moulins transforment l'énergie du vent en énergie mécanique (fréquemment exploité pour triturer du grain, presser des produits oléifères, battre des métaux ou les fibres du papier, ou relever de l'eau). En 1888, Charles F. Brush créa la première éolienne. En construisant une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité figure (1), avec un stockage par batterie d'accumulateurs.[5]

Les énergies éoliennes sont totalement disculpées parmi ces nouvelles énergies, ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur capacité, La rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à sa fonction.

Les pays occidentaux sont les plus avancés dans le développement des éoliennes, même si, des pays Asiatiques comme la Chine ou l'Inde commencent à suivre le mouvement. L'entreprise EDF annonce dans un rapport que l'éolien est actuellement la filière énergétique la plus active dans le monde. Et c'est particulièrement le cas dans l'Union Européenne avec une augmentation moyenne de 37,8% de la production d'électricité par an de 1993 jusqu'en 2002. En effet, l'Allemagne est le leader mondial dans cette filière avec 22 247 MW d'énergie aménagée en 2007. Puis, suivent les Etats-Unis avec 16 819 MW et enfin l'Espagne avec 15 145 MW.[4]

Dans les années 50, en Algérie, des centaines d'éoliennes étaient encore utilisées spécialement pour le pompage de l'eau dans les sites isolés et qui exhibent un potentiel éolien considérable.

Temps actuel, l'énergie d'origine électrique éolienne est parfois contemplée comme la plus encourageante des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire.[3]



Figure 1 : Eolienne de Charles. F. Brush (Etats-Unis, 1888).

I.2. Généralité sur les éoliennes

I.2.1. Définition d'une éolienne

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies reconvertibles. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique combinée à la turbine éolienne [6]. Cette conjonction mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre d'ampleur, soit accompli par le médiateur d'un multiplicateur dans le cas inverse. Enfin il existe différents modèles d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit-elle alimentée des foyers isolés.

Le système de conversion éolien est également le siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion [2].

I.2.2. Les types des éoliennes

Il existe différents types d'éoliennes : les éoliennes classiques, à axe vertical ou sur axe Horizontal qui ont généralement trois pales, mais peuvent aussi en avoir deux (1), voire une seule (2).

Comme on peut trouver aussi des éoliennes à axe vertical, tel que les éoliennes de Darrieux (3), les Éoliennes de Savonius (4), ou encore des éoliennes à hélic (5).

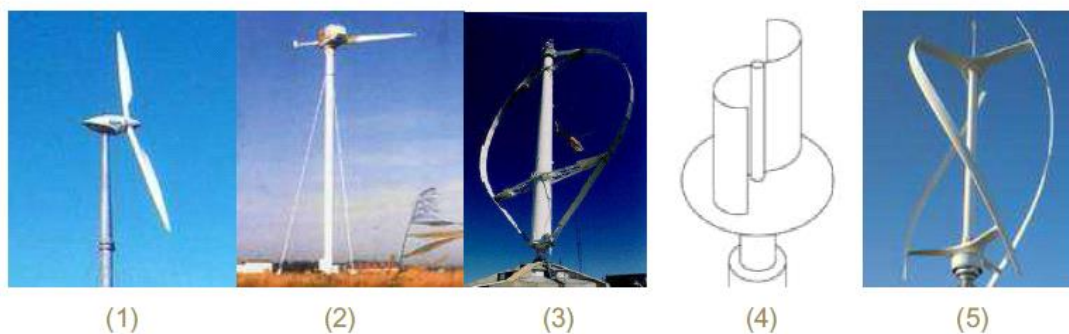


Figure 2: Les différents types d'éoliennes.

I.2.3. Eolienne à axe horizontal

Ces éoliennes sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles rigides sur une composition habituellement en bois, qui ont été ensuite modifiées par des éléments ressemblant solidement à des ailes d'avion figure (3). Ces ailes qui sont installées dans le vent n'épaulent pas ici à alimenter un avion mais elles servent à générer un couple moteur guidé à entraîner un agencement mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe... etc. [7]



Figure 3: Eolienne à axe horizontal.

Ces éoliennes à axe horizontal, généralement, ce sont des éoliennes à trois pales : en effet, un nombre impair de pales consent d'assurer la stabilité de l'éolienne. Si on ne met que deux pales sur une éolienne, lorsque l'une des pales passera devant le mat et sera donc abritée du vent, la seconde pale sera tout en haut, là où elle reçoit le plus de vent, ce qui déséquilibre l'éolienne.

Donc on peut dire que les Eoliennes à axe horizontal sont les plus usitées car leur productivité aérodynamique est supérieure à celui des éoliennes à axe vertical. Ces machines

présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 profilées aérodynamiques présentées dans la figure (4), elles peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Leur axe de propagation est semblable au sol [8]. On peut faire une différenciation entre les éoliennes suivant le nombre de pales figure (4).

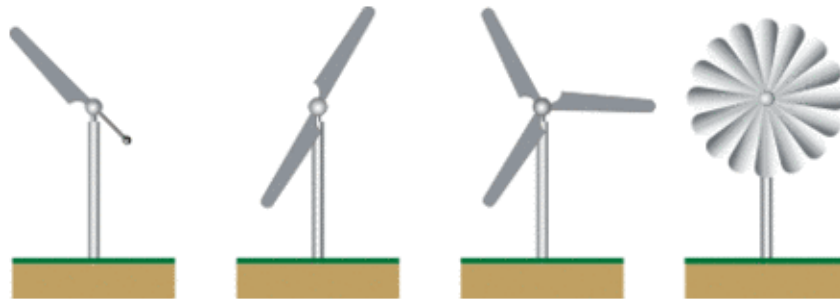


Figure 4: Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

I.2.4. Éolien à l'axe vertical

Par rapport à la direction du vent, elle n'a pas besoin de système d'orientation, mais elle est fréquemment de conception assez alambiquée [9].

Éolienne Savonius : En 1924, l'ingénieur Finnois *Sigurd Savonius* a inventée cette éolienne à l'axe vertical et a été affirmée en 1929 [10]. La marche du rotor de Savonius est fondée sur un couple aérodynamique issue par la déflexion de l'écoulement sur *Éolienne de Darrieus* : Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui pivote au centre d'un stator à ailettes. Ce type de solution réduit profusément le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220km/h [9].



Figure 5: Éolienne types Savonius.



Figure 6: Éolienne de type Darrieus.

I.3. Approche mondiale d'énergie éolienne

I.3.1. L'éolien dans le monde

Etant donné que ces éoliens en avancement durable dans le développement mènent les Etats à remettre en cause des procédés de production d'énergie et à élever la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto impose et engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord a participé à l'émergence de politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies également car les éoliennes n'émettent pas de dioxyde de carbone [10].

Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

- Le progrès des performances en aérodynamique pour la création des turbines éoliennes,
- L'évolution de l'électronique de puissance et les nouvelles connaissances,
- L'aide financier des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes.

Avantages et Inconvénients des Eoliens

a) Avantages de l'énergie éolienne : Elle ne consomme pas de combustibles, abondante, pollution zéro, comme elle peut être complémentaire aux filières traditionnelles aussi elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins, par exemple agricoles, elle compte parmi les systèmes de production d'énergie électrique les plus sûrs, bonne vie utile des appareils

b) Inconvénients de l'énergie éolienne : Difficulté de stockage de l'énergie, elle est toujours soumise à des bouleversements du vent et à des périodes de calme, instable, les équipements sont chers et produisent du bruit, impact visuel [11].

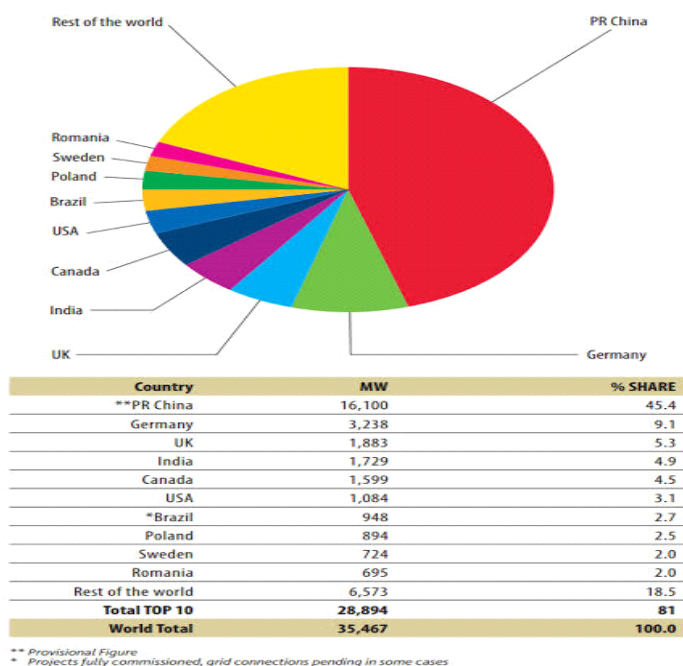


Figure 7: Classement les énergies éoliennes dans le monde.

I.3.2. Aux USA et en Chine

Les Etats-Unis figuraient à la première place depuis 2007 ; ce n'est qu'en 2010 que la Chine cumule 42,3 GW d'énergie éolienne et devient premier pays en termes de capacité installée totale. Le pays a installé 16,5 GW en 2010, ce qui constitue un nouveau record par rapport aux 13,8 GW de 2009. Cela met la Chine sur la bonne voie pour atteindre les 200 GW de puissance éolienne installée d'ici 2020 et produire 15 % de son électricité à partir de sources renouvelables. Pour atteindre ce résultat, le gouvernement a identifié en 2008 les six régions les plus ventées et leur a affecté des objectifs de capacité installée – compris entre 10 GW et 23 GW – à atteindre d'ici 2020.

Durant le même temps, la Chine est aussi devenue le premier producteur mondial d'éoliennes avec 7 entreprises dans le top 15 mondial des fabricants. En 2010, le constructeur *Chinois Sinovel* (11 % du marché) se hisse à la deuxième place, derrière le danois *Vesta* mais devant l'américain *General Electric* (10 %) qui est relégué au troisième rang, ex-æquo avec un autre chinois, *Goldwind*, qui détient lui aussi 10 % du marché. Aux ETATS-UNIS, un ensemble de mesures, prises en 2009, ont été très bénéfiques pour maintenir la dynamique dans le secteur lors du ralentissement économique de la période 2008-2009. À la fin de l'année 2009, l'industrie éolienne américaine employait 85 000 personnes [10].

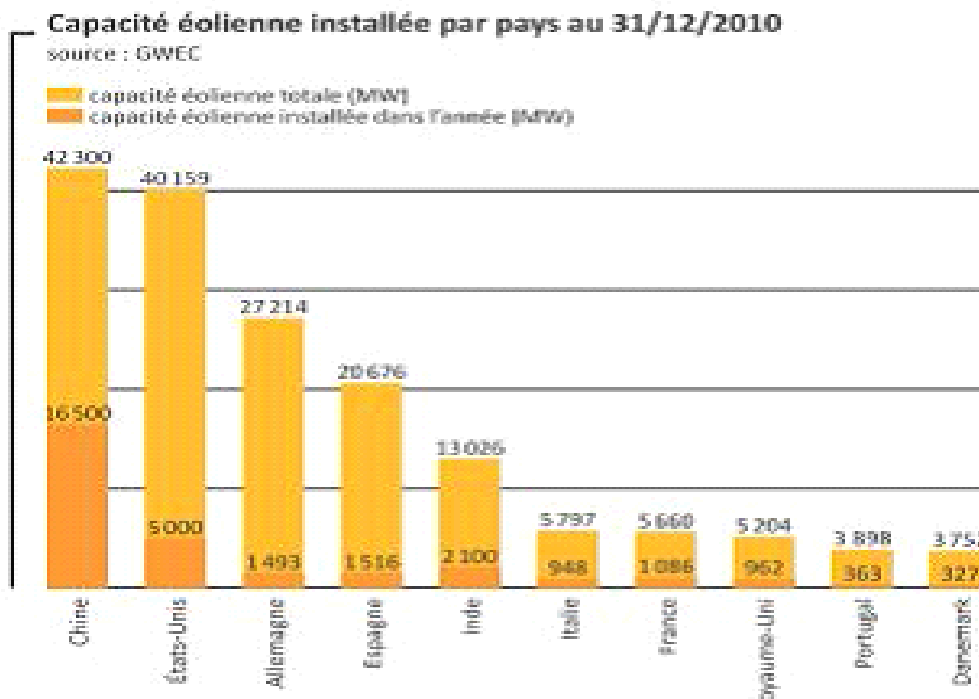


Figure 8: Capacité éolienne installée dans le monde.

I.3.3. En Europe

L'Europe a pris un grand avancement en matière d'énergies renouvelables en envisageant d'atteindre l'objectif de 20 % d'énergies renouvelables dans sa consommation finale d'énergie en 2020. L'éolien contribuera à l'essentiel de cet objectif, en ce qui concerne la production d'électricité. Fin 2010, 84 278 Mw éoliens sont installés en Europe, pour une production annuelle de 181 millions de Mwh, soit 5,3 % de la consommation électrique européenne.

Plusieurs pays ont annoncé des plans de développement massif : outre le Danemark (3180 Mw), l'Allemagne (23 903Mw) et l'Espagne (16 740 Mw), locomotives historiques de l'éolien en Europe, le Royaume-Uni a récemment annoncé un programme d'investissement dans les énergies renouvelables de 100 milliards de livres d'ici 2020, dont une importante partie consacrée à l'énergie éolienne qui devra totaliser 28 000 Mw en 2020.

De son côté, la Norvège a dévoilé un programme d'investissement à grande échelle visant à créer entre 5 000 et 8 000 mW de capacités supplémentaires [10].

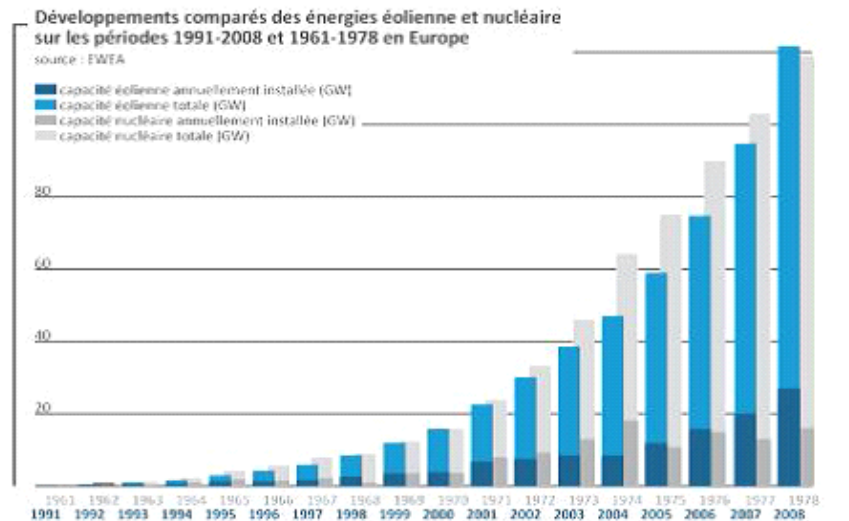


Figure 9: Développement d'énergie éolienne dans le monde.

I.3.4. En Asie et en Afrique

Fin 2010, l'Inde est installée le cinquième marché mondial de l'éolien avec plus de 13 000 Mw. Selon l'agence internationale de l'Énergie, la puissance installée pourrait atteindre 65Gw en 2020. Suzlon, son principal opérateur industriel, est devenu l'un des premiers constructeurs mondiaux. De son côté, l'Afrique bénéficie d'un vaste potentiel pour le développement de l'énergie éolienne, surtout dans le nord, le long des côtes et en Afrique du sud. À la fin de l'année 2009, environ 96 % des installations éoliennes du continent (763 Mw) se trouvaient en Egypte (430 Mw), au Maroc (253 Mw) et en Tunisie (54 Mw).

En Afrique du sud, 7 000 Mw sont actuellement en développement [10].

I.4. Potentiel éolien en Algérie

I.4.1. Bref aperçu sur l'historique d'énergie éolienne en Algérie

Dans le domaine des énergies éoliennes l'Algérie garde une place très lente comparant par le développement rapide connue dans le monde. Néanmoins, elle aménage de tous les nécessaires pour le développement des énergies éoliennes, elle présente un potentiel éolien immense qui peut être utilisé pour la production d'énergie électrique. En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique le 1957, avec une installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) présenté sur la figure (10), conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable, de 30 m de hauteur et d'un diamètre de 25 m racheté par Electricité et Gaz d'Algérie puis démonté et installé en Algérie [12].



Figure 10: Eolienne de 100 kW de Grand Vent

I.4.2. Le vent en Algérie

Le vent est la variable d'entrée d'un système éolien. Son utilisation est en plein développement dans le monde, actuellement elle commence à être importante en Algérie. Nous devons faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites pour identifier le paramètre nécessaire du vent. La figure (10) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'énergie éolienne du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).

CHAPITRE II

FONCTIONNEMENT DE L'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL

II. 1. Introduction

L'étude présentée dans ce chapitre a pour objectif de montrer les performances énergétiques d'un aérogénérateur, afin de maximiser l'énergie éolienne captée tout en diminuant les problèmes de structure. Cette étude est permet de comprendre les enjeux liée à la géométrie des pales. Les pales d'un aérogénérateur sont exposées, durant leur fonctionnement, à des chargements cycliques complexes dus à des conditions environnementales sévères et très variables, comme le cas des vents forts et des rafales qui engendrent des efforts extrêmes, favorisant ainsi la fatigue des pales. Cette fatigue est l'un des problèmes sérieux pouvant entraver le bon fonctionnement de l'éolienne. Cette étude met l'accent sur la structure de l'éolienne à axe horizontal.

II.2. Définition d'une éolienne à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamique et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine. Le plus souvent, le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et permet donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde car ; leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [13].

II.3. Les composants d'une éolienne à axe horizontal

La figure ci-dessous présente une éolienne Classique a axe horizontal. Elle est composée de différents éléments tels que le mat, les pales, et la nacelle, mais aussi un système d'orientation, un frein, un multiplicateur, un système de régulation électrique, un générateur, etc. [14]

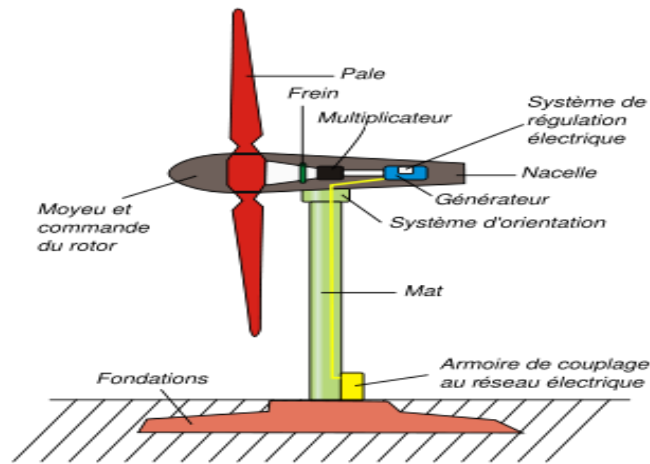


Figure 11 : Schéma d'une éolienne tripale.

II.3.1. Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre présente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur) [3].

II.3.2. La nacelle

La figure ci-dessous nous montre la structure d'une nacelle d'éolienne, cette dernière comprend tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique qui est produit par la rotation des pales en énergie électrique [15].

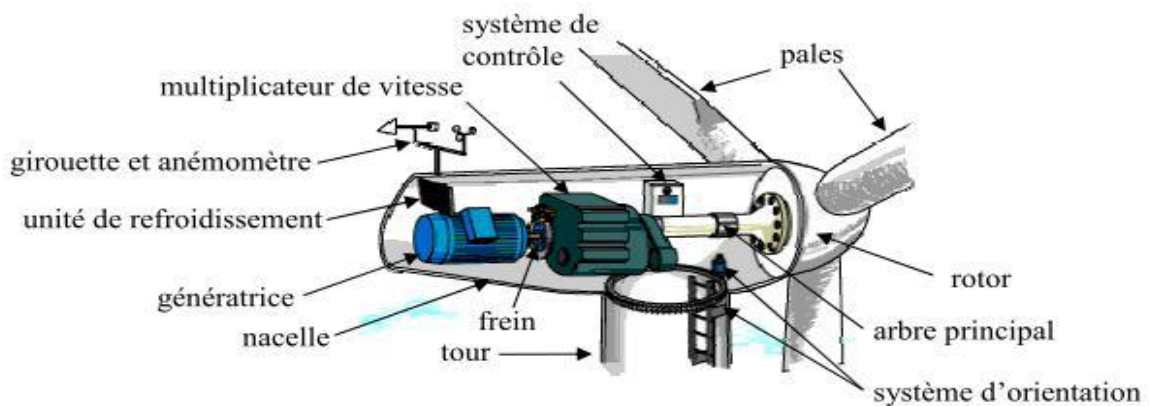


Figure 12 : Structure d'une nacelle d'éolienne à axe horizontale.

Les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur de celle-ci nous trouvons aussi la boîte de vitesse, la génératrice, les systèmes de contrôle, le capteur de

température, le capteur de vibration et le capteur de vitesse [15]. Les éléments compris dans la nacelle sont :

Le rotor : sur lequel les pales sont fixées sur le bout de l'éolienne.

Système de verrouillage du rotor : Les freins s'activent lorsque la vitesse du vent est supérieure à 25m/s, ils empêchent ainsi le rotor de fonctionner.

L'arbre principale : Il est entraîné par les pales et tourne à une vitesse assez basse mais avec un moment important.

Le multiplicateur : L'arbre principal transmet un très grand moment de rotation au multiplicateur. Par la suite, celui-ci transforme ce moment d'une rotation à faible vitesse et un fort moment, à une rotation avec une grande vitesse et un moment faible.

L'arbre rapide : C'est le lien entre la génératrice et le multiplicateur. Sa vitesse de rotation est d'environ 1 500 tours par minute.

La génératrice : Sa fonction est de transformer l'énergie mécanique en une énergie électrique.

La girouette et l'anémomètre : Ces deux instruments servent à mesurer la vitesse et l'orientation du vent. Ils se situent derrière les pales. Ils prennent des mesures entre deux passages des pales et établissent la moyenne des valeurs enregistrées. Le pivot d'orientation : Il permet à l'éolienne de présenter l'hélice face au vent quel que soit sa direction [15].

II.3.3. Les fondations

Les fondations sont construites en béton armé. Elles sont des blocs de 100 tonnes ou plus enterrés de 5 à 6 mètres de profondeur. Une dalle est moulée par-dessus afin de fixer la première partie du mât de l'éolienne. Pour une éolienne de 80m de haut, il faut 400 tonnes de béton [15].



Figure 13 : la fondation l'éolienne.

II.4. Principe de fonctionnement

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique soit, il est direct si la turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit il est réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin, il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique, ou elle alimente des charges isolées [16].

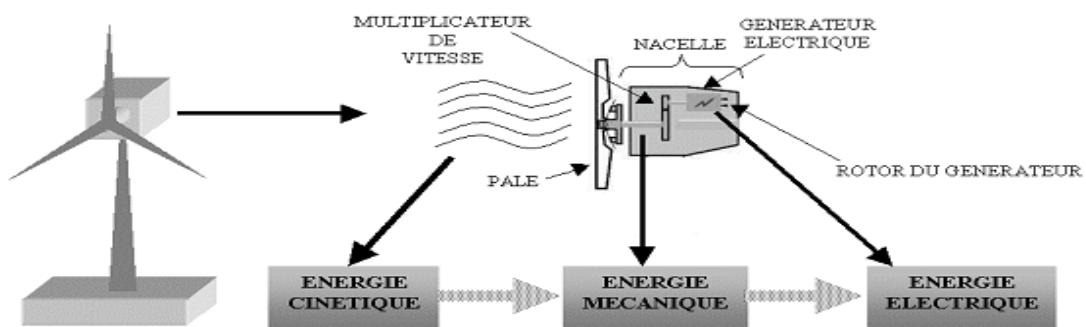


Figure 14 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

II.5. Contrôle des éoliennes

II.5.1. Régulation et freinage par basculement de l'éolienne

Le basculement de l'éolienne entraîne une réduction de la surface effective balayée par le rotor. Pour réduire cette surface il faut augmenter l'angle formé par l'axe de rotation du rotor et la direction du vent dominant soit en faisant basculer l'hélice vers le haut soit en le faisant pivoter sur le côté. Lorsque le rotor est "effacé" vers le haut ou sur le côté, le rendement du rotor diminue considérablement et la puissance produite chute rapidement [17].

II.5.2. Régulation et freinage par gouvernail articulé

À partir d'un certain niveau de vent, jugé excessif pour la sécurité mécanique de l'éolienne, le gouvernail se replie progressivement et automatiquement en travers de l'axe du vent. Non seulement il freine l'écoulement, ralentissant la vitesse, mais il détourne l'éolienne de la perpendiculaire au vent. Celle-ci devient alors de moins en moins efficace et sa vitesse ne peut augmenter même si le vent force [17].

II.5.3. Système de Régulation aérodynamique

a) Le pas variable

Le pas variable, aussi appelé *pitch control*, est un système de régulation aérodynamique actif. Ce système consiste à faire varier l'angle de calage des pales sur le moyeu à l'aide de vérins hydrauliques autour d'un axe longitudinal pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. Ce système permet :

- D'arrêter l'éolienne ou en limiter la puissance afin de la protéger des vents violents en plaçant les pales en drapeau et réduisant ainsi la prise au vent
- De maximiser l'énergie absorbée par l'éolienne pour la faire démarrer : généralement les pales pivotent de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent de manière à ce que les pales soient toujours positionnées avec un angle optimal par rapport à la direction du vent pour en extraire la puissance maximale.

C'est le système le plus efficace car il permet une régulation constante et presque parfaite de la rotation du générateur en bout de ligne, donc de la puissance, mais c'est un dispositif complexe, qui exige davantage d'entretien [17].

b) Le pas fixe

La désignation "pas fixe" est impropre car en réalité elle désigne une pale dont le calage est fixe mais le pas varie tout le long de l'envergure de la pale (tout comme le pas variable, la pale est vrillée), le système régulation à angle fixe est plus correct. Le pas fixe, aussi appelé **stall control**, est un système de régulation aérodynamique passif. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Ce système empêche les pales, qui sont conçues spécialement pour subir des décrochages [17].

c) Les volets

Les volets (aérofrein ou flaps) s'ouvrent automatiquement, si la vitesse du vent devient excessive ou si un problème est décelé, et ralentissent les pales ou diminuent leur portance en provoquant un décrochage aérodynamique [17].

d) Les spoilers

Les spoilers sont encastrés dans le bord d'attaque des pales (freinage aérodynamique). Chaque spoiler est maintenu dans son logement par un ressort de rappel et une masse tarée

individuellement en fonction de la position du spoiler sur le bord d'attaque de la pale. À partir d'une certaine vitesse linéaire, la force centrifuge provoque l'éjection de tous les spoilers au même moment modifiant ainsi le profil aérodynamique de la pale [17].

e) Arrêt par frein à disque automatique

Un détecteur de vitesse déclenche, à un certain seuil prédéterminé, un mécanisme automatique d'arrêt complet de l'éolienne. Il ne s'agit plus d'un système de ralentissement, mais bien d'un stoppage complet. Lorsque le vent baisse d'intensité, le frein est relâché et l'éolienne est de nouveau libérée. Ces arrêts peuvent aussi être déclenchés lorsque l'automate détecte un problème de réseau [17].

Régulation active par décrochage aérodynamique

Aussi appelé "active stall", ce système est utilisé pour les éoliennes de fortes puissances, il utilise les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité [17].

Les mécanismes d'arrêt

Ce sont les dispositifs qui permettent d'immobiliser le rotor afin d'effectuer des réparations, des travaux de maintenance, ou toutes autres manœuvres sur la machine [17].

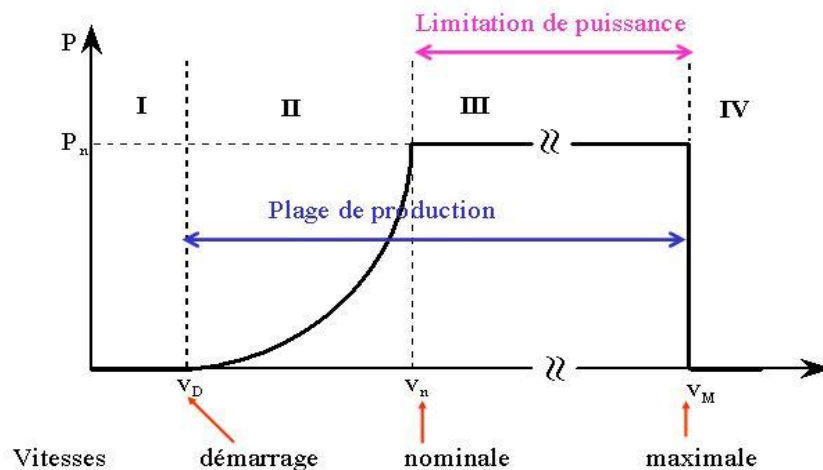


Figure 15 : Plages d'exploitation d'une turbine éolienne (axe horizontal) en fonction de la vitesse du vent.

CHAPITRE III

ETUDE AERODYNAMIQUE D'UNE PALE D'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL

III. 1.Introduction

L'éolienne est, par définition, un dispositif mécanique utilisant la force motrice du vent. Cette force peut être utilisée mécaniquement pour produire de l'électricité. La limite de *Betz* prouve qu'une partie seulement de la puissance cinétique du vent peut être transformée en puissance mécanique via le rotor éolien. Afin de proposer des éoliennes fiables et performantes, et de les dimensionner correctement, les constructeurs doivent donc disposer d'outils capables de calculer rapidement les efforts en service. Notre enjeu dans ce chapitre est de mettre en exergue la modélisation aérodynamique de la pale éolienne à axe horizontal, les spécifications aérodynamiques de la pale prennent un large intérêt dans la conception de rotor éolien, des calculs très poussés doivent être conduits dans le but de déterminer les différentes grandeurs essentiels de la pale, dans ce sens on débute le chapitre par l'étude idéale d'un rotor d'éolienne (théorie simplifiée) l'exposition présente des idées essentielles le comportement général des rotors des éoliennes supportant un flux d'air. L'analyse est utilisée pour déterminer les limites des performances théoriques pour ces éoliennes.

III.2. Théorie de Betz

Pour déterminer la puissance d'un rotor d'une turbine pure, Un modèle général, attribuée la théorie à Betz (1926). Par le calcul de la poussée du vent sur le rotor et de la réaction du rotor sur le champ du vent local. Le modèle d'un éolien à axe horizontale. Est connu par « est sous forme d'un disque » dans lequel le rotor est apparent comme un disque cohérent qui extrait l'énergie du vent. La théorie du disque est basée sur une théorie Dynamique linéaire développée depuis plus de 100 ans pour prédire la performance d'hélice de Navire.

La théorie de l'action sur le disque idéal est basée sur les hypothèses suivantes [18] :

- Le flux du fluide est régulier, Homogène, incompressible.
- Pas de traînée de frottement.
- L'augmentation de la pression ou de la poussée par unité de surface est constante sur tout le disque
- La composante de rotation de la vitesse dans le sillage est nulle.
- Il y'a une continuité de la vitesse à travers le disque.
- Un nombre infini de lames.

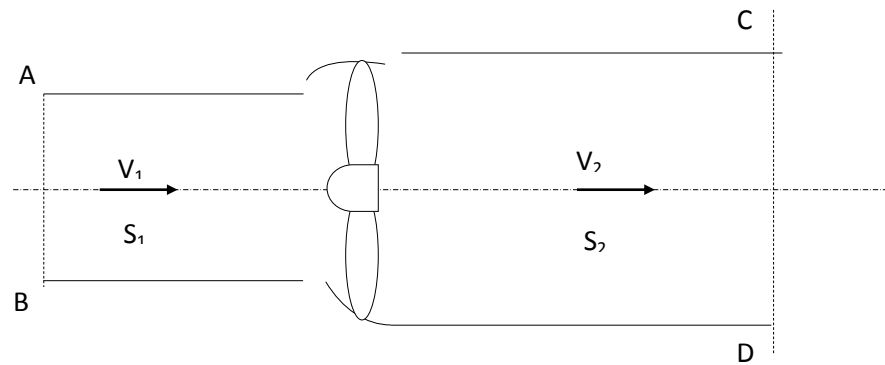


Figure 16: Veine de fluide traverse l'éolienne.

- V_1 : La vitesse en amont du disque.
- v_2 : La vitesse en aval du disque.
- V : La vitesse de l'air à la traversée de l'aéromoteur.
- S_1 : section en amont.
- S_2 : sections en aval.

La production d'énergie ne pouvant se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique contenu dans le vent.

Pour déterminer les variations à travers le disque on applique les lois suivantes [2] :

- Loi de variation de la quantité de mouvement.
- Loi de conservation de la masse.
- Loi de variation d'énergie cinétique.

La permanence d'écoulement et l'incompressibilité de l'air (Loi de conservation de la masse) donne :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 = Q \quad (\text{III.1})$$

Q : est le débit.

III.2.1. Définition de l'action du moteur éolien sur l'air

D'après le théorème d'Euler la force exercée par le moteur éolien sur l'air en mouvement F est dirigée vers l'avant et égale en valeur absolue à la variation de la quantité de mouvement (Loi de variation de la quantité de mouvement) [18] :

$$F = \Delta Q \dot{m} / \Delta t \quad (\text{III.2})$$

Avec $\Delta Q m$: variation de quantité de mouvement

$$\text{Avec :} \quad \Delta Q m = m v_1 - m v_2 \quad (\text{III.3})$$

$$F = \Delta Q m = \dot{m} v_1 - m v_2 \quad (\text{III.4})$$

$$F = \dot{m} (v_1 - v_2) \quad (\text{III.5})$$

$$F = \rho S V (v_1 - v_2) \quad (\text{III.6})$$

Évaluons la puissance absorbée par l'éolienne, c'est-à-dire dû à la force F :

$$P = FV = \rho S V (v_1 - v_2) V \quad (\text{III.7})$$

$$P = FV = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{III.8})$$

III.2.2. Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien

D'après la loi de conservation de l'énergie, la variation de l'énergie cinétique de la masse autour du système ^[18] est donnée comme suit :

$$Ec_1 = Ec + Ec_2 \quad (\text{III.9})$$

- Ec_1 : Énergie cinétique à l'amont.
- Ec : Puissance du moteur éolien ou l'énergie cinétique transformée.
- Ec_2 : Énergie cinétique à l'aval.

$$P = Ec_1 + Ec_2 = \frac{1}{2} V_1^2 + \frac{1}{2} V_2^2 \quad (\text{III.10})$$

$$M = \rho S V \quad (\text{III.11})$$

$$P = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.12})$$

Par égalisation de (III.7) et (III.12) on obtient :

$$\rho S V V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.13})$$

$$\rho S V V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1 + V_2) (V_1 - V_2) \quad (\text{III.14})$$

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.15})$$

Substituant l'équation trouvée dans les équations (III.6) et (III.7) :

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.16})$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.17})$$

III.2.3. La puissance maximale absorbée par le moteur éolien

Le changement de la puissance absorbée par le moteur éolien regardé (équation III.17), On suppose que la vitesse v_1 du vent en amont est constante, et on dérive par rapport à v_2 :

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho S [V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2] \quad (\text{III.18})$$

Le maximum de la fonction P correspond à la condition suivante :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \Rightarrow V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2 = 0 \quad (\text{III.19})$$

Admettant les deux solutions qui suivantes :

$V_2 = -V_1$ n'a aucun sens physique, par conséquent la solution acceptable est :

$V_2 = \frac{V_1}{3}$ Remplaçant cette valeur dans l'équation (III.17), on obtient :

$$P_{\max} = \frac{1}{4} \rho S \left(V_1 + \frac{V_1}{3} \right) \left(V_1^2 - \left(\frac{V_1}{3} \right)^2 \right) \quad (\text{III.20})$$

$$\text{Ou } P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 \quad (\text{III.21})$$

$$V_{\max} = \frac{V_1 + \frac{V_1}{3}}{2} = \frac{4V_1}{3 \cdot 2} = \frac{2V_1}{3} \quad (\text{III.22})$$

$$\text{De l'équation (III.1) on à } S_1 v_1 = S v = S_2 v_2 \quad (\text{III.23})$$

$$S v_{\max} = S \frac{2V_1}{3} = S_1 v_1 \Rightarrow S_1 = \frac{2}{3} S \text{ et } S = \frac{3}{2} S_1 \quad (\text{III.24})$$

Substituant l'équation (III.24) dans l'équation (III.21), la puissance maximale est donnée par :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho \frac{3}{2} S_1 V_1^3 \right) \quad (\text{III.25})$$

$$P_{\max} = \frac{8}{9} \left(\frac{1}{2} \rho S_1 V_1^3 \right) \quad (\text{III.26})$$

En optant sur cette forme la formule de Betz, montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par une éolienne ne peut dépasser les $\left(\frac{8}{9}\right)$ de l'énergie cinétique de la masse d'air qui la parcourt. En effet la puissance des éoliennes la mieux conçue ne dépasses pas 60 à 70 % de la limites de betz.

III.3. Théorie de dynamique d'élément de pale (Gluaert) :

L'aire qui parcourt une hélice tournante crée un système tourbillonnaire qui a un impact sur le rendement du moteur éolien, ce système est constitué par ^[18] :

- Des tourbillons attachés aux pales résultant de la rotation de l'aire autour de la pale sous l'effet d'une suppression à l'intrados et d'une dépression à l'extrados du profile de la pale.
- Des tourbillons détachés des pales formant deux tourbillons marginaux prenant naissance l'un près de l'axe de rotation de l'hélice et l'autre à l'extrémité de la

pale, le premier enroulé par des spires autour de l'axe de l'éolien et le second enveloppe l'hélice.

L'effet total du système tourbillonnaire se résume dans un champ de vitesse appelée vitesse induite et qui a une influence sur la vitesse relative déterminée par la théorie simplifiée.

La détermination du champ de vitesse induite permet de corriger et de donner des valeurs des paramètres aérodynamiques de la pale de façon plus précis et tenant compte des pertes.

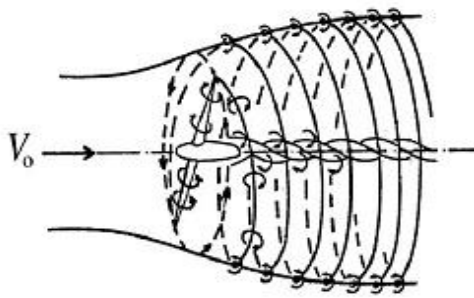


Figure 17 : Système tourbillonnaire.

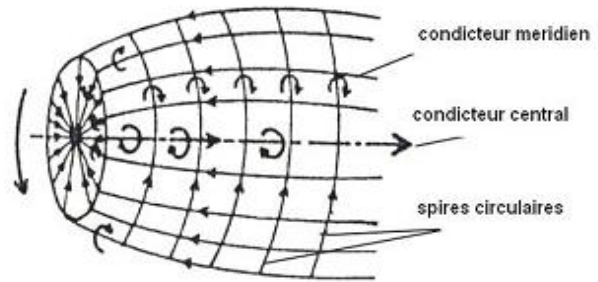


Figure 18: Modèle électrique équivalent.

III.3.1. Détermination de la vitesse induite et de la vitesse relative

La théorie de Glauert modélise le problème tourbillonnaire par un modèle de système électrique équivalent qui permet de calculer la vitesse induite d'une manière simple, par la détermination des champs magnétiques créés par des conducteurs et par l'application du théorème d'Ampère et Biot-Savart [18].

Le théorème de Biot-Savart donne le champ magnétique créé par un fil conducteur selon l'équation :

$$H = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \quad (\text{III.49})$$

- Pour un champ magnétique créé par un courant parcourant un fil semi-fini l'équation devient :

$$\text{Fil semi-fini : } \alpha_1 \rightarrow \frac{\pi}{2}, \alpha_2 \rightarrow 0$$

$$\text{Donc : } H = -\frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (\text{III.50})$$

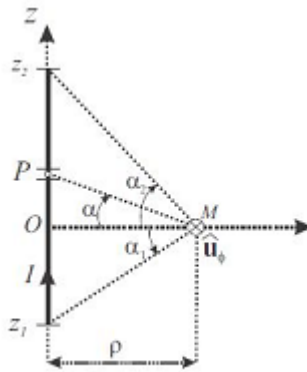


Figure 19: Champ magnétique crée autour d'un fil.

- Champ magnétique créé par courant dans un solénoïde infini :

L'équation générale est :

$$H = \frac{\mu_0 I n}{2} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \quad (\text{III.51})$$

n : est le nombre de spires.

- Au centre du solénoïde le champ est :

$$\alpha^1 \rightarrow \frac{\pi}{2}, \alpha \rightarrow \pi \Rightarrow H = \mu^0 I n \quad (\text{III.52})$$

- A l'extrémité du solénoïde le champ devient :

$$\alpha^1 \rightarrow 0, \alpha \rightarrow \pi \Rightarrow H = \frac{\mu_0 I n}{2} \quad (\text{III.53})$$

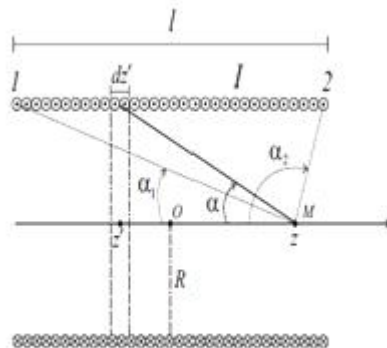


Figure 20 : Champ magnétique crée par un solénoïde.

En imaginant une similitude entre un champ magnétique crée par un conducteur et les mouvements tourbillonnaire crée par le mouvement de l'air on peut dire :

- A l'amant de disque il n'y a pas de courant donc il n'y a pas de champ.
- Au niveau du disque :

Dans le plan du disque qui correspond à l'extrémité du solénoïde le champ est égal à [18] :

$$H_{d1} = H_c = \frac{\mu_0 I n}{2} \quad (\text{III.54})$$

Le champ crée par le conducteur central et les conducteurs méridiens est égale ^[18] :

$$H_{d2} = H_c = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (\text{III.55})$$

A l'aval de disque:

Le champ est égal à deux fois le champ créé au niveau du disque à cause de la faible distance qui sépare les plans :

$$H\alpha = 2 H_d$$

Le champ créé par les spires à une résultante égale [19] :

$$H\alpha_1 = 2 H_s \quad (\text{III.56})$$

$$H\alpha_1 = 2 H_s = \frac{\mu_0 I n}{2} + \frac{\mu_0 I n}{2} = -\mu_0 I n \quad (\text{III.57})$$

Le champ créé par le conducteur central et les conducteurs méridiens est égale à:

$$H\alpha_2 = 2 H_s = -\frac{\mu_0 I n}{\pi R} \quad (\text{III.58})$$

Revenons maintenant au problème concernant l'éolien, à l'aval du disque le champ $2H_d$ créé par les conducteurs central et méridiens est perpendiculaire à l'axe et correspond à une vitesse tangentielle induite (v_θ) La rotation de l'air est dans la direction opposée de la rotation des pales avec une vitesse angulaire (ω) [19].

Au niveau du disque le champ H_d créé par les conducteurs central et méridiens correspond à une vitesse tangentielle induite ($\frac{v}{2}$), et on a une rotation de l'air dans la direction opposée de la rotation des pales avec une vitesse angulaire ($\frac{\omega}{2}$).

D'autre part à l'aval du disque le champ (H_s) créé par les spires correspond à une vitesse axial induite (v_x).

Dans le sens contraire à la vitesse du vent avant de disque. Alors qu'au niveau du disque cette intensité vaut ($\frac{v_x}{2}$).

On définit la vitesse axiale résultante comme suite :

$$V = V_1 - \frac{v_x}{2} \quad \text{À l'aval de disque.} \quad (\text{III.59})$$

$$V_2 = V_1 - v_x \quad \text{Au niveau de disque.} \quad (\text{III.60})$$

On élimine v_x et on obtient :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.61})$$

Donc la relation de Betz reste valable [18].

La variation de la vitesse axiale est représentée par le facteur d'induction axial (α) qui s'écrit [17,18] :

$$\alpha = \frac{V_1 + V}{V_1} \Rightarrow V = (1 - \alpha)V_1 \quad (\text{III.62})$$

$$\text{Donc : } \frac{v_x}{2} = \alpha V_1 \Rightarrow v_x = 2\alpha V_1 \quad (\text{III.63})$$

$$\text{Alors : } V_2 = V_1 - v_x \Leftrightarrow V_2 = V_1 - 2\alpha V_1 \quad (\text{III.64})$$

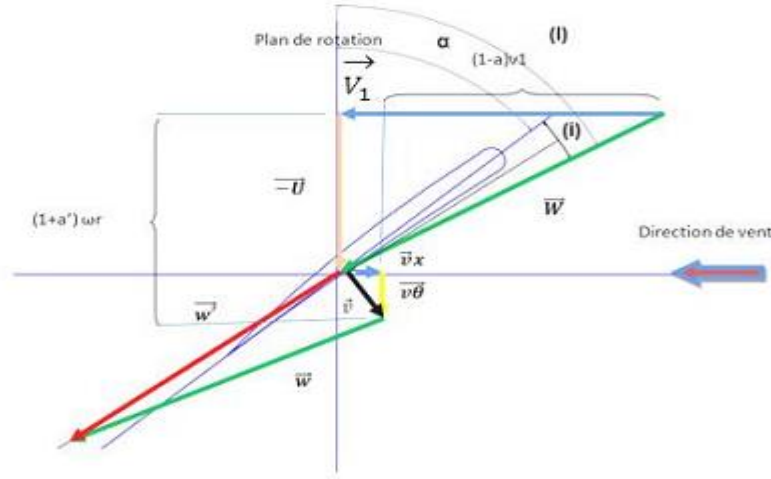


Figure 21 : Vitesses induites (théorie de Glauert).

Variation de la vitesse angulaire au niveau du disque est représentée par le facteur d'induction tangentiel (α') et s'écrit [17,18] :

$$\alpha' = \frac{(\omega)}{2\Omega}$$

La vitesse tangentielle de rotation de l'air devient :

$$U' = \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) r = (\Omega + \alpha' \Omega) r \quad (\text{III.65})$$

$$U' = (1 + \alpha') \Omega r \quad (\text{III.66})$$

$$\text{Et la vitesse relative devient : } W = \frac{V}{\sin i} = \frac{(1-\alpha)V}{\sin i} = \frac{U'}{\cos i} = \frac{(1+\alpha')\Omega r}{\cos i} \quad (\text{III.67})$$

III.3.2. Détermination de la poussée axiale et du moment moteur

D'après le théorème d'Euler, la poussée axiale élémentaire est :

$$dF = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) ds \quad (\text{III.68})$$

$$\text{Avec : } ds = 2\pi r dr \quad (\text{III.69})$$

$$dF = \pi \rho r (V_1^2 - V_2^2) dr \quad (\text{III.70})$$

Remplaçant V par son expression ;

$$dF = 4\alpha(1 - \alpha)\pi \rho r V_1^2 dr \quad (\text{III.71})$$

D'autre part le moment est égal à :

$$M = \frac{dl}{dt} \quad (\text{III.72})$$

Ou L : est le moment cinétique :

$$l = In \cdot \omega \quad (\text{III.73})$$

Et In est le moment d'inertie, qui est égale à :

$$In = mr^2 \quad (\text{III.74})$$

$$M = \frac{dl}{dt} = \frac{dm}{dt} \omega r^2 \quad (\text{III.75})$$

$$dM = d\dot{m} \omega r^2$$

$$d\dot{m} = \rho 2\pi r V_2 dr$$

$$D'où \quad dM = \rho 2\pi r^3 V_2 \omega dr \quad (\text{III.76})$$

On substitue par les expressions de ω et de V_2 , et on obtient :

$$dM = 4 \alpha' (1 - \alpha) \rho \pi r^3 V_1 \omega dr \quad (\text{III.77})$$

Cette équation donne le moment élémentaire agissant sur l'éolienne.

III.3.3. Détermination de la puissance utile et du coefficient de puissance

La puissance utile élémentaire est donnée par l'expression suivante :

$$dP_U = dM \Omega \quad (\text{III.78})$$

Par l'utilisation de l'équation (III.77) vient :

$$dP_U = 4 \alpha' (1 - \alpha) \rho \pi r^3 V_1 \Omega^2 dr \quad (\text{III.79})$$

Par l'introduction de la vitesse spécifique :

$$\lambda_r = \lambda \frac{r}{R} \quad \Rightarrow \quad r = R \frac{\lambda_r}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad dr = R \frac{d\lambda_r}{\lambda} \quad (\text{III.80})$$

$$dP_U = 4 \alpha' (1 - \alpha) \rho \pi \left(R \frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^3 V_1 \Omega^2 R \frac{d\lambda_r}{\lambda} \quad (\text{III.81})$$

Après réajustement on aboutit à :

$$dP_U = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho \pi R^3} v_1^3 \left[\frac{8}{(1-\alpha)\lambda^2} \alpha' \lambda_r^3 \right] d\lambda_r \quad (\text{III.82})$$

Le coefficient de puissance élémentaire est défini par :

$$dC_p = \frac{dP_U}{p} = \frac{\frac{1}{2\rho\pi R^3 v_1^3} \left[\frac{8}{(1-\alpha)\lambda^2} \alpha' \lambda_r^3 \right] d\lambda_r}{\frac{1}{2}\rho\pi R^3 v_1^3} \quad (\text{III.83})$$

$$dC_p = \frac{8}{\lambda^2} \alpha' (1-\alpha) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (\text{III.84})$$

Donc le coefficient de puissance total est égale à :

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda \alpha' (1-\alpha) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (\text{III.85})$$

Le coefficient prend une valeur maximale quand la quantité $\alpha'(1-\alpha)$ prend une valeur maximale.

$$Z = \alpha'(1-\alpha) \quad (\text{III.86})$$

$$Z = \max \Rightarrow \frac{dz}{d\alpha'} = 0 \quad (\text{III.87})$$

$$\frac{dz}{d\alpha'} = \frac{d\alpha'(1-\alpha)}{d\alpha'} + \frac{d}{d\alpha'} \alpha'(1-\alpha) = 0 \quad (\text{III.88})$$

$$\frac{d\alpha}{d\alpha'} = \frac{(1-\alpha)}{\alpha'} \quad (\text{III.90})$$

La puissance utile se calcul via le moment moteur ou par l'équation d'Euler, ce qui peut se traduire par :

$$dP_U = dM \cdot \Omega = FV = F \cdot V_1 (1-\alpha)$$

$$4\alpha'(1-\alpha)\rho\pi r^3 V_1 \Omega^2 dr = 4\alpha(1-\alpha)^2 \rho\pi r v_1^3 dr$$

$$\alpha' r^2 \Omega = \alpha(1-\alpha) v_1^2$$

En réarrangeant la dernière équation on obtient

$$r^2 \Omega^2 / v_1^2 = \alpha(1-\alpha) / \alpha'$$

Ce qui permet d'introduire la vitesse spécifique

$$\lambda_r^2 = \alpha(1-\alpha) / \alpha'$$

$$\alpha - \alpha^2 = \alpha' \lambda_r^2 \quad (\text{III.91})$$

La différentiation de cette dernière équation donne :

$$(1-2\alpha)d\alpha = \lambda_r^2 / d\alpha' \quad (\text{III.92})$$

$$d\alpha/d\alpha' = \lambda_r^2/d(1 - 2\alpha) \quad (\text{III.93})$$

La combinaison des équations (III.90) et (III.93) aboutie à :

$$\alpha' \lambda_r^2 = (1 - \alpha)(1 - 2\alpha) \quad (\text{III.94})$$

La comparaison entre (III.91) et (III.94) donne une valeur maximale pour (α) :

$$\alpha = \frac{1}{3} \quad (\text{III.95})$$

De l'équation (III.91) :

$$\alpha' = \frac{\alpha(1-\alpha)}{\lambda_r^2} \quad (\text{III.96})$$

L'induction à flux axial qui correspond à l'extraction de la puissance maximale est la même que pour le cas d'un flux non rotatif, qui est ($\alpha = 1/3$), de plus il est uniforme sur la totalité du disque [18], d'autre part (α') varie avec la position radiale selon l'équation (III.96).

On substitue (α') dans la formule de (C_p):

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda \left[\frac{\alpha(1-\alpha)}{\lambda_r^2} \right] (1 - \alpha) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (\text{III.97})$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda [\alpha(1 - \alpha)^2 \lambda r] d\lambda_r \quad (\text{III.98})$$

$$\text{On a : } dr = R \frac{d\lambda_r}{\lambda} \text{ donc } \lambda dr / R = d\lambda_r \quad (\text{III.99})$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^R [\alpha(1 - \alpha)^2 \lambda \frac{r}{R}] \frac{\lambda}{R} dr \quad (\text{III.100})$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \alpha(1 - \alpha)^2 \frac{\lambda^2}{R^2} \left[\frac{r^2}{2} \right]_0^R \quad (\text{III.101})$$

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \alpha(1 - \alpha)^2 \frac{\lambda^2}{R^2} \left[\frac{R^2}{2} \right] \quad (\text{III.102})$$

$$C_p = 4 \alpha(1 - \alpha)^2 \quad (\text{III.103})$$

Ce dernier résultat montre que le coefficient de puissance donné par la théorie de Glauert est le même que celui donné par la théorie de Froude avec une valeur de coefficient inductions tangentiel :

$$\alpha' = (\alpha(1-\alpha)) / (\lambda_r^2) \quad (\text{III.104})$$

CHAPITRE IV

LES CHARGES AÉRODYNAMIQUES SUR UNE PALE ÉOLIENNE

IV. 1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mettre en exergues par une modélisation mathématique les différentes charges aérodynamiques à lesquelles les pales sont sujettes dans un système éolien. Les pales sont caractérisées par une géométrie spéciale, le dimensionnement de leurs formes géométriques à un grand impact sur le rendement énergétique, par conséquent sur leurs rentabilités économiques. Les pales sont soumises en marche normale, aux forces aérodynamiques, aux forces centrifuges et de pesanteur et aux efforts gyroscopiques, qui apparaissent lors des changements d'orientation de l'axe de l'éolienne et aux vibrations. Les pales doivent supporter également sans détérioration, les conditions climatiques les plus extrêmes ainsi les ouragans les plus violents.

Les charges correspondantes on peut les classer en plusieurs catégories : ordinaires, cycliques, temporaires et exceptionnelles.^[20]

L'effet de la force de poussé axiale :

La poussée axiale exercée sur le rotor est donnée par l'équation suivante :

$$F = \frac{1}{2} \rho C_F S V_1^2$$

Pour un calcul plus fluide, on suppose que la pression qui s'exerce sur le cercle balayé est uniforme et égale à :

$$P_1 = \frac{F}{S} = \frac{1}{2} \rho C_F S V_1^2$$

La poussée par pale selon l'axe de rotation est donc : $F_V = \frac{F}{P}$

Cette valeur correspond à la force axiale qui s'exerce une partie du cercle balayé, on peut également l'exprimer sous cette forme $\pi R^2 \frac{P_1}{P}$ avec p nombres de pales, chaque élément de

Pale compris entre r et r+dr supporte une poussée axiale égale à :

$$2\pi r P_1 \frac{dr}{P} = f_V dr \text{ en posant } f_V = \frac{2\pi r P_1}{P}$$

Le diagramme de charge représenté dans la Figure (22) est triangulaire, la résultante des forces F_V est appliquée aux $2/3R$, à partir du centre du rotor.

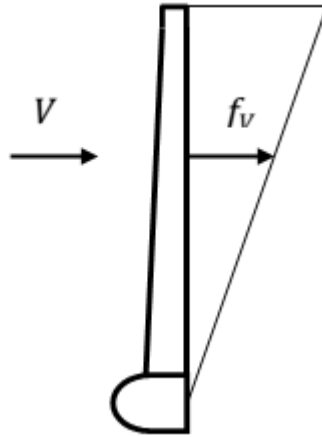


Figure 22 : Diagramme de charge triangulaire de la pale.

Le moment de flexion M_{fV} créé par ces forces, à la racine de la pale égale à :

$$M_{fV} = \frac{2}{3}RF_P = \frac{\pi\rho C_F R^3 V_1^2}{3P}$$

La connaissance du moment de flexion à la racine de la pale nous donne la possibilité de calculer la contrainte en pied de pale. Si on suppose cette racine est sous forme cylindrique et la section nette de la pale comprise entre deux cylindres de rayons r_1 et r_2 .

Les contraintes maximales en pied de pale en tension et en compression sont données par l'expression suivante :

$$R_{fa} = \frac{M_{fV}r_1}{I_X} \text{ Avec } I_X = \frac{\pi(r_1^4 - r_2^4)}{4}$$

Le moment de flexion dans la section distante de x du centre s'élève à :

$$M_{fVx} = \int_x^R f_V(r-x)dr = 2\pi \frac{P_1}{P} \int_x^R r(r-x)dr = 2\pi \frac{P_1}{3P} (R^3 - 3R^2 \frac{x}{2} + \frac{x^3}{2})$$

Les contraintes maximales en tension sur l'intrados et en compression sur l'extrados sont données par $R_{fVx} = \frac{M_{fVx}y}{I_X}$ avec y ayant la valeur y_1 pour l'intrados et y_2 pour l'extrados.

y_1 et y_2 désignant respectivement les distances à l'axe neutre des fibres les plus fatiguées en tension et en compression et I_X , le moment d'inertie par rapport à l'axe neutre longitudinal de la section (parallèle à la corde).

IV.1. L'effet de la force centrifuge :

Les contraintes dues aux forces centrifuges en marche changent leurs rapports de force selon la section sur laquelle la contrainte est appliquée, celle-ci est définie par rapport à la distance de la section exposée à la contrainte de l'axe. La force centrifuge exercé sur la pale comprise entre les distances à l'axe r et $r+dr$, s'exprime par la relation :

$$dF_c = \rho_e S_n \omega^2 r dr$$

ρ_e : la masse spécifique du matériau constitutif de la pale

S_n : la section nette de la pale, à la distance r

La contrainte due à la force centrifuge, dans la section située à une distance x de l'axe est déterminée par conséquent, par l'expression :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S_x} = \frac{1}{S_x} \int_x^R \rho_e S_n \omega^2 r dr$$

Cette contrainte correspond à l'effort de traction, elle s'ajoute aux contraintes de flexion du fait de l'existence des forces centrifuges, les fibres étirées par la flexion, le sont davantage mais elles qui étaient comprimées, le sont moins. En particulier, la fibre la plus comprimée voit sa fatigue réduite.

IV.2. Effets des charges gyroscopiques :

Principalement les charges gyroscopiques sont dues par un réalignement de l'axe de rotation du rotor. La variation de l'angle de calage, peut aussi causer des chargements inertiels. Le changement d'orientation de l'axe de l'éolienne et les variations de la direction du vent font apparaître des efforts gyroscopiques. Désignons par ω la vitesse de rotation de l'éolienne que nous supposons constantes en grandeur et par Ω sa vitesse d'orientation

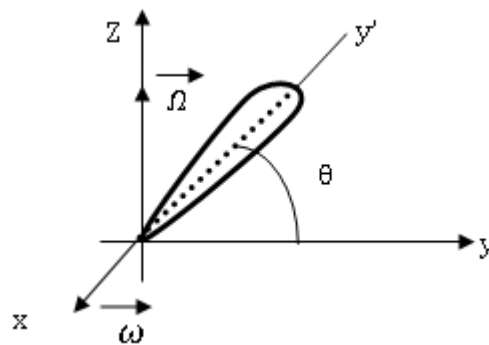


Figure 23 : Effet gyroscopique sur élément de pale.

a) Le premiers $Oxyz$ (R) tournant avec l'axe de l'éolienne de façon que les vecteurs ω et soient portés par les axes Ox et Oz , l'axe Ox étant confondu avec l'axe de l'hélice, l'axe Oz étant dirigé suivant la verticale.

b) Le seconde $Oxy'z'$ (R') entraîné en rotation par l'hélice, l'axe Oy' étant dirigé suivant une pale.

En admettant que le moment d'inertie de la pale par rapport à Oy' est négligeable, la matrice d'inertie et le moment cinétique de la pale par rapport au trièdre $Oxy'z'$, ont pour expression :

$$A = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix}$$

$$A \begin{pmatrix} \omega \\ \Omega \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \Omega \sin \theta \\ \Omega \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \omega \\ 0 \\ I_1 \Omega \cos \theta \end{bmatrix}$$

L'application du théorème du moment cinétique à la pale dont l'axe longitudinale coïncide avec Oy', dans le repère Oxy'z', permet d'écrire :

$$\vec{M} = \frac{d}{dt} [A (\vec{\omega} + \vec{\Omega})]_{R'} + (\vec{\omega} + \vec{\Omega}) \wedge A (\vec{\omega} + \vec{\Omega})$$

\vec{M}

M : désignons le moment résultant appliqué à la pale par rapport au point O

C'est-à-dire la résultante du moment des forces aérodynamiques \vec{M}_a et du moment d'encastrement \vec{M}_e dû au moyeu que nous supposons de rayon négligeable, après le calcul du M on obtient :

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} \left(\frac{I_1}{2}\right) \Omega^2 \sin 2\theta \\ 0 \\ I_1 \frac{d\Omega}{dt} \cos \theta - 2I_1 \Omega \omega \sin \theta \end{bmatrix}$$

Dans le cas où la direction de l'éolienne ne varie pas ($\Omega=0$), le moment M est nul. On a alors

$$\vec{M} = \vec{M}_e + \vec{M}_a = 0 \quad \text{donc} \quad M_e = -M_a$$

Le moment d'encastrement équilibre le moment aérodynamique. Dans le cas où la direction de l'éolienne change, le moment M qui apparaît, développe des contraintes supplémentaires qui accroissent la fatigue du matériau constitutif de la pale, l'équation vectorielle précédente qui on peut mettre sous la forme équivalente :

$$\vec{M}_i + \vec{M}_e + \vec{M}_a = 0 \Rightarrow \vec{M}_e = -(\vec{M}_a + \vec{M}_i)$$

Le moment M_i des forces d'inertie étant égale a $-\vec{M}$

Dans l'hypothèse où l'axe de l'éolienne oscille en direction autour d'une position moyenne et selon la loi angulaire on a :

$$\alpha = \alpha_0 \sin 2\pi \frac{t}{T} = \alpha_0 \sin \omega_1 t$$

$$\Omega = \frac{d\alpha}{dt} = \alpha_0 \omega_1 \cos \omega_1 t = \Omega_0 \cos \omega_1 t$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\Omega_0 \omega_1 \sin \omega_1 t = -\alpha_0 \omega_1^2 \sin \omega_1 t$$

ω_1 étant petit devant ω . La composante du moment M, la plus dangereuse pour la pale est la composante suivant Oz' car celle dispose le plus grand module et agit dans le sens de la moins grande rigidité. Elle comporte deux termes d'amplitude inégale qui sont en quadrature :

$$I_1 \frac{d\Omega}{dt} \cos\theta = -I_1 \alpha_0 \omega_1^2 \sin\omega_1 t \cos\theta$$

$$-2I_1 \Omega \omega \sin\theta = -2I_1 \alpha_0 \omega_1 \omega \cos\omega_1 t \sin\theta$$

ω_1 étant petit devant ω de ce fait le dernier terme qui représente le moment des forces d'inertie de Coriolis, est le plus important. Son amplitude est maximale pour $(\theta = \pm \frac{\pi}{2})$.

La contrainte de l'effet gyroscopique atteint son niveau maximal quand la pale est verticale, la quantité $2I_1 \alpha_0 \omega_1 \omega = 2I_1 \Omega_0 \omega$ représente le moment fléchissant maximum supplémentaire dû à l'effet gyroscopique, qui vient s'ajouter au moment fléchissant dû aux forces aérodynamiques. Si on appelle i_1 le moment d'inertie mécanique par rapport à l'axe longitudinal de la section x, du tronçon de la pale compris entre l'extrémité R et l'abscisse x.

La contrainte due à l'effet gyroscopique à la distance x s'exprime par la relation [20] :

$$\sigma_g = \frac{2i_1 \Omega_0 \omega V}{I_x}$$

Observation : Les effets gyroscopiques accroissent les contraintes dans les pales, l'augmentation est d'autant plus importante que la vitesse spécifique λ_0 est faible.

CHAPITRE V

DETERMINATION LA MEILLEURE FORME DE PALE EOLIENNE

V. 1. Structure de la pale

La pale éolienne est généralement construite en matériaux composite. Le corps de la pale est constitué en deux parties. Le premier parti est la coque de la pale qui présente la couche extérieure de la pale. Le deuxième parti est la nervure qui présente le squelette de la pale. Elle est mise pour renforcer et protéger la coque contre les grandes flexions figure (24).

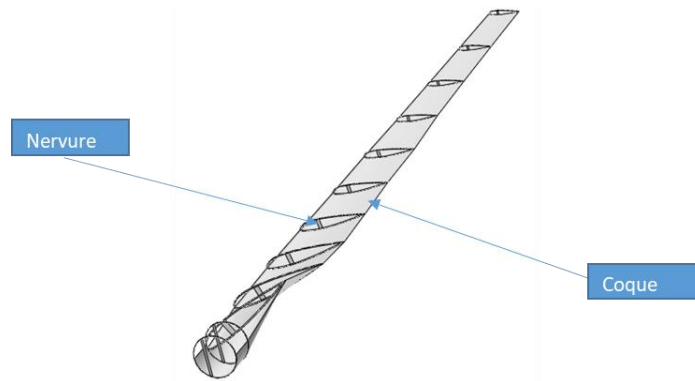


Figure 24 : La structure de la pale.

V.2. Matériaux composites :

Un matériau composite est un couplage de deux matériaux ou plus. Ces matériaux ont des caractéristiques défèrent. Ce couplage est pour but d'obtenir des nouveaux matériaux avec des propriétés fonctionnels plus élevés, tels que la légèreté, grande résistance à la fatigue, liberté de formes etc.

Le matériau composite se compose en deux parties généralement. La partie présente la matrice et un autre présente le renfort. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure suivante [21].

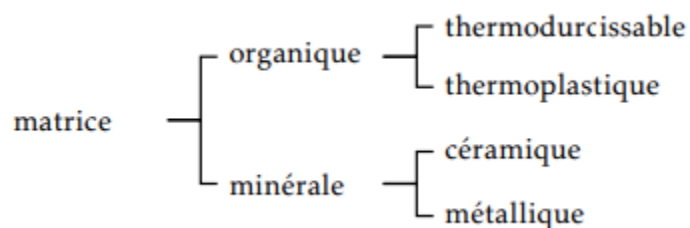


Figure 25 : Les types de matrice du matériau composite.

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri- directionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la

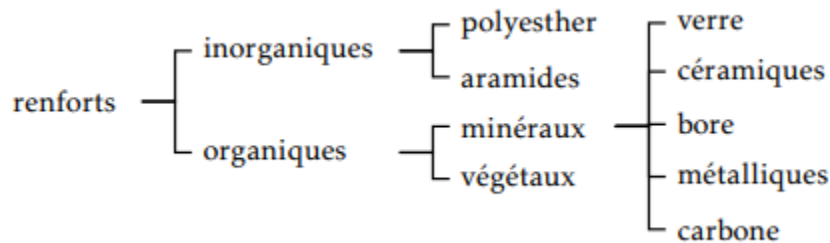


Figure 26 : Les types de renforts du matériau composite.

La structure du matériau composite peut être de forme stratifiée, forme sandwich ou tissées multidirectionnelles. Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. Les structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale [21].

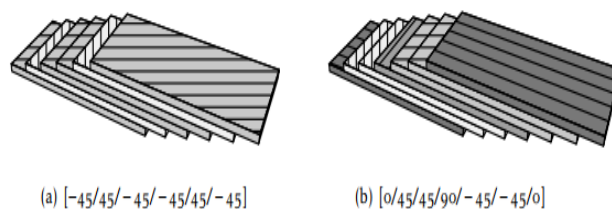


Figure 27 : Les structure de stratifie du matériau composite.

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à

l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur la figure suivante [21].

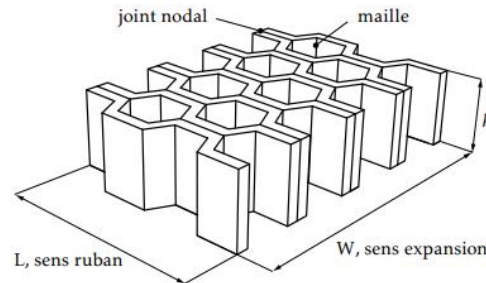


Figure 28 : La structure sandwich du matériau composite.

Il est possible de créer des pièces en matériaux composites de type tridimensionnelles massives ou des formes de révolution. Des tissages volumiques de type 2D (deux directions de renfort), 3D-evolutif (deux directions de renfort et un piquage dans la troisième direction), 3D (trois directions de renfort), 4D (quatre directions de renfort), ou plus sont élaborés dans l'industrie aéronautique. Il est également possible de tisser des cylindres ou des cônes afin de réaliser des réservoirs ou des tuyères. Dans ces derniers cas, les fils de renforts s'entrecroisent en hélice. Quelques exemples de matériaux composites multidirectionnels sont maintenant présentés. Les structures massives sont principalement utilisées dans le domaine aéronautique et restent très marginales en raison de leur coût de production très élevé [21].

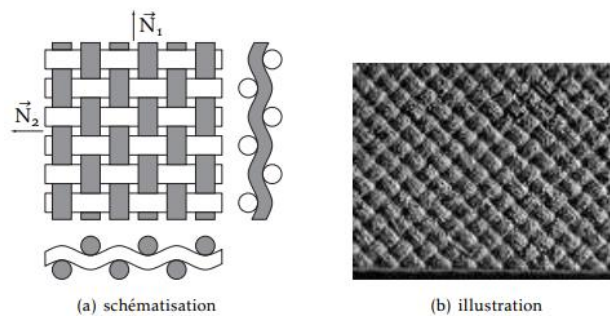


Figure 29 : La structure de tissu du matériau composite.

V.3. Etude Performance structurale de la pale :

L'efficacité globale de la pale éolienne englobe la performance aérodynamique et la résistance de la pale des charges brusque et à la dégradation. Ce dernier présente la performance structurale qui relie avec le choix de matériaux et la meilleure distribution d'épaisseur de matériaux. Dans cette partie, nous avons présenté une démarche pour déterminer la forme de la pale optimale avec minimum de poids. Ou la distribution de

matériaux assure une résistance élevée. D'autre part, la performance aérodynamique reste élevée.

V.3.1. Méthode d'étude :

D'abord, nous avons proposé un modèle d'éolienne a vitesse fixe de 40tr/min .il est destiné pour installer à la zone de Wilaya de Biskra. A cette zone le vent a une vitesse moyenne de 4.5m/s. Sous la base des normes IEC, la vitesse de conception de la pale est égale 1.4 fois de la vitesse moyenne de site [22]. La vitesse de conception est égale 6.3m/s. Ainsi que l'éolien a des pales de 7.5 m. la hauteur du mat est de 22m. les pales ont une section de profile NACA 23015 qui a un coefficient de portance de XXX mesuré à 7.5° d'angle d'attaque et 10^6 de nombre de Reynolds [23]. Les pales sont fabriquées en Epoxy-Fibre de verre.

Pour définir la meilleure forme de la pale. Nous avons estimé plusieurs distributions d'épaisseur de la pale comme présente le tableau (1). L'étude est faite pour une position verticale instantanée comme présente la figure (30). Ou la 'effet de pesanteur et gyroscopique sont nulle. Aussi l'éolien est estimé fonctionner dans un intervalle de vitesse du vent de 3m/s jusqu'à 16m/s. Cette étude est faite par l'utilisation du logiciel Qblade [24].

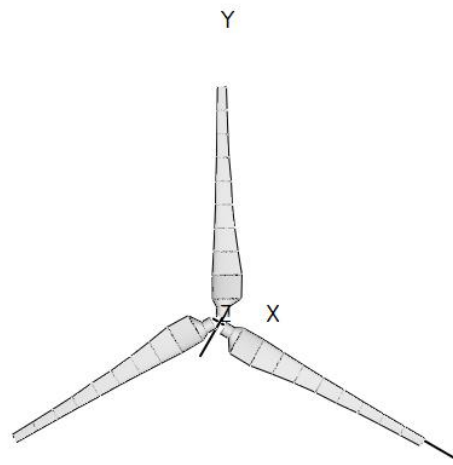


Figure 30 : La position d'étude.

Tab.1. Les modèles d'étude.

Epaisseur	Nervure = 5% Corde	Nervure = 8% Corde	Nervure = 10% Corde
Coque 1% de Corde	n5c1	n8c1	n10c1
Coque 2% de Corde	n5c2	n8c2	n10c2
Coque 3% de Corde	n5c3	n8c3	n10c3

V.3.2. Outils de calcul (Qblade) :

QBlade est un logiciel de calcul d'éoliennes à code source ouvert, distribué sous GPL. Ce logiciel est basé sur la théorie de la dynamique d'élément de pale avancé. D'autre part, la fonctionnalité de XFOIL / XFLR5 sont inclus. Ce qui permet à l'utilisateur de concevoir rapidement des profils aérodynamiques personnalisés, de calculer leurs polaires de performance et de les intégrer directement à la conception et à la simulation de rotors d'éoliennes [24].

Le logiciel est particulièrement adapté à l'enseignement car il offre des fonctionnalités pratiques de conception et de simulation pour la conception de rotors HAWT et VAWT et montre toutes les relations fondamentales des concepts de conception et des performances des turbines de manière simple et intuitive.

QBlade inclut également de nombreuses fonctionnalités de post-traitement pour les simulations de rotor et de turbine et donne un aperçu détaillé de toutes les variables pertinentes des pales et des rotors. En plus de cela, le logiciel résultant est une plate-forme très flexible et conviviale pour la conception d'aubes d'éoliennes [25].

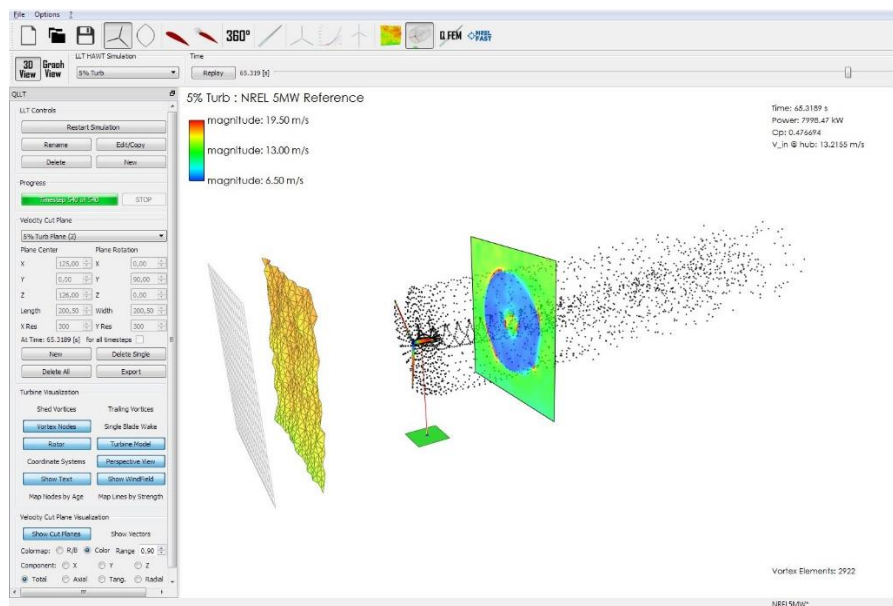


Figure 31 : L'interface de Qblade.

V.3.3. Résultats et discussions :

L'utilisation du module BEM sur Qblade donne une distribution de la longueur de la corde commence par 1.07m au pied de la pale et 0.28 m au bout. Le vrillage de la forme aussi commencer par 32° au pied et termine par -1.6° au bout de la pale comme présente la figure (32). D'après l'analyses aérodynamique, l'éolien a une valeur maximale de coefficient de puissance de 0.46 (figure .33). Cette valeur est atteinte à la vitesse moyenne. Les résultats

aussi présente que cet éolien a une puissance nominale égale 20KW qui lui atteint à la vitesse 10m/s (figure. 34).

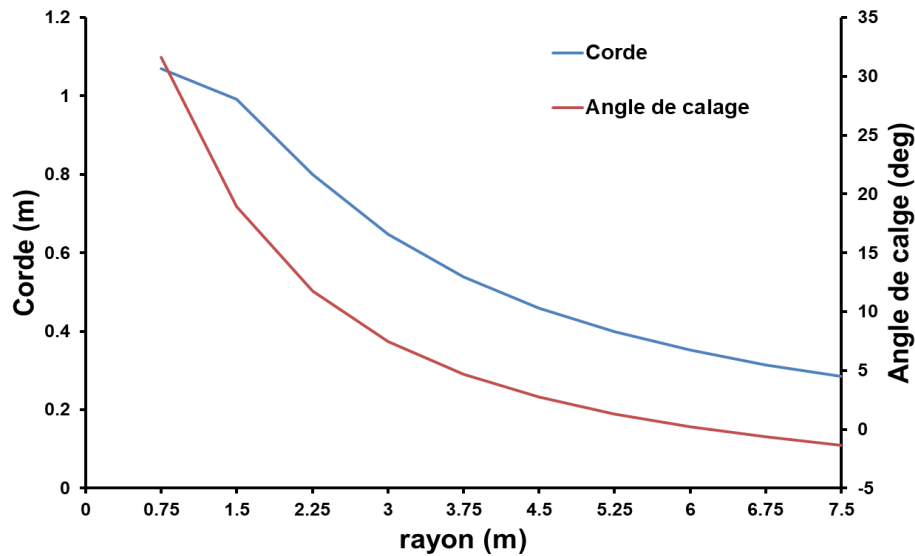


Figure 32 : La distribution de la corde et l'angle de calage

Le passage du vent au niveau de rotor éolien met les pales de rotor sous une des forces normales et autre tangentielle. La force normale présente l'effet normale de pression de l'air. La force tangentielle présente l'effet aérodynamique du vent sur les pales. Les figure (35-36) montrent la variation de la force normale et tangentielle au long de la pale entre la vitesse d'entre qui égale 3m/s et la vitesse de sortie qu'est égale 16m/s. d'après les figures (35), la force normale augment progressivement sous l'augmentation de la vitesse du vent. Nous montrons aussi que la force normale a une distribution pseudo-linéaire a des valeurs moins que la valeur de vitesse de conception avec un augmentation de pied vers le bout de la pale. Plus que la valeur de conception cette force a une distribution presque uniforme au long de la pale. Cette dernière est plus claire après la valeur de 10 m/s ce explique que le rotor tourne sous une pression d'air uniforme. D'autres part, la force tangentielle ou la force moteur stabilise en même valeur pour les vitesses plus de valeur de conception avec des pic près de pied de la pale qui fait par l'effet de large angle d'écoulement. Ces derniers expliquent la rotation des pales dans un phénomène d'écoulement stable dans toutes les sections des pales ou le rotor éolien donne une puissance pseudo constant qui est connait par la puissance nominale.

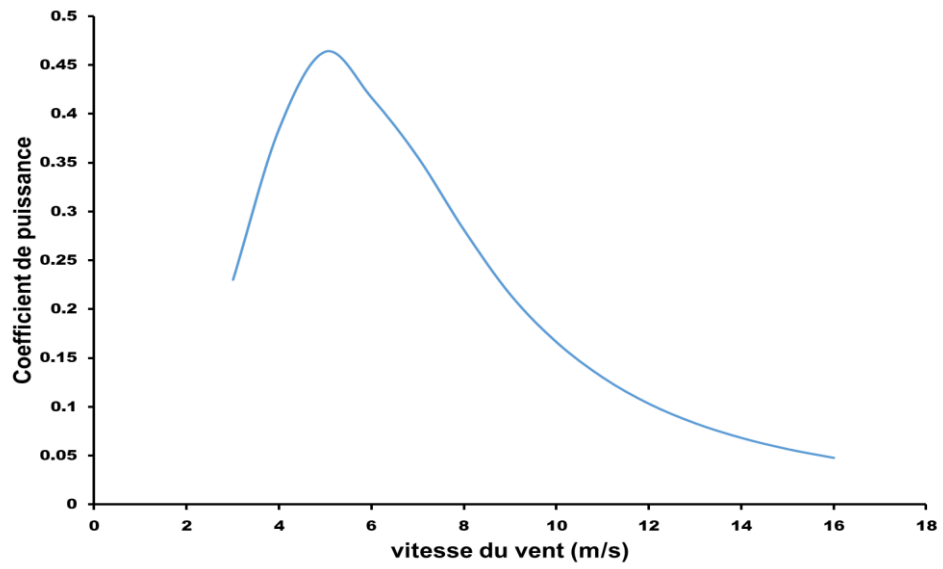


Figure 33 : La variation du coefficient de puissance.

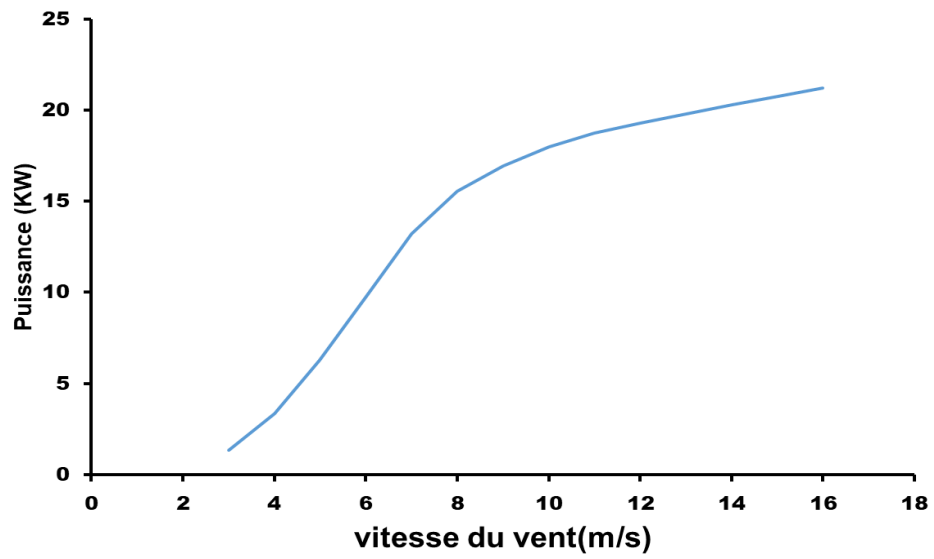


Figure 34 : La variation de la puissance.

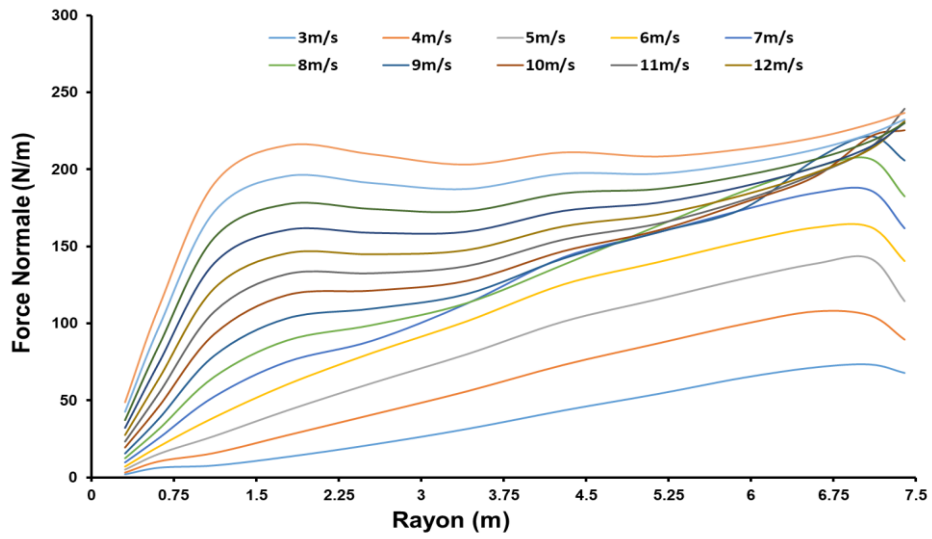


Figure 35 : La variation de la force normale.

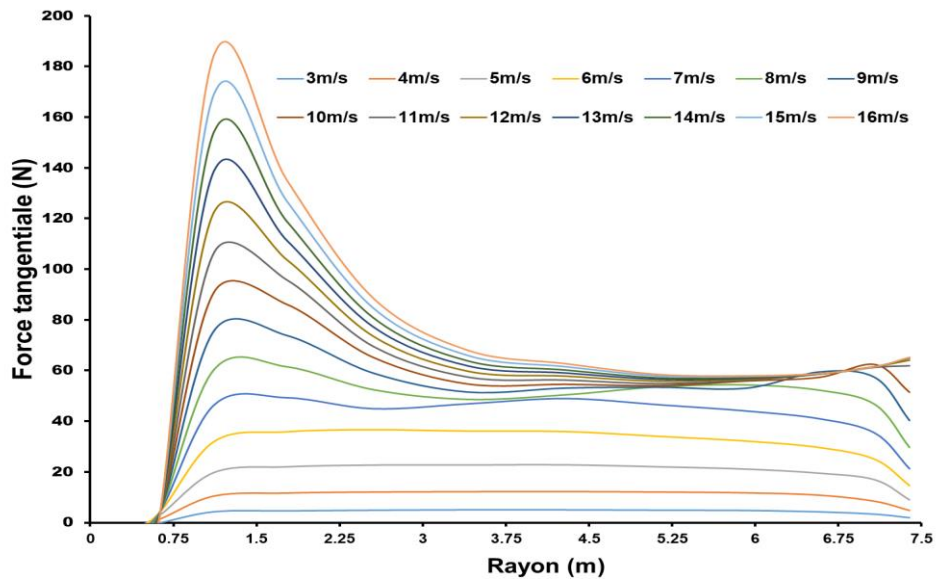


Figure 36 : La variation de la force tangentielle.

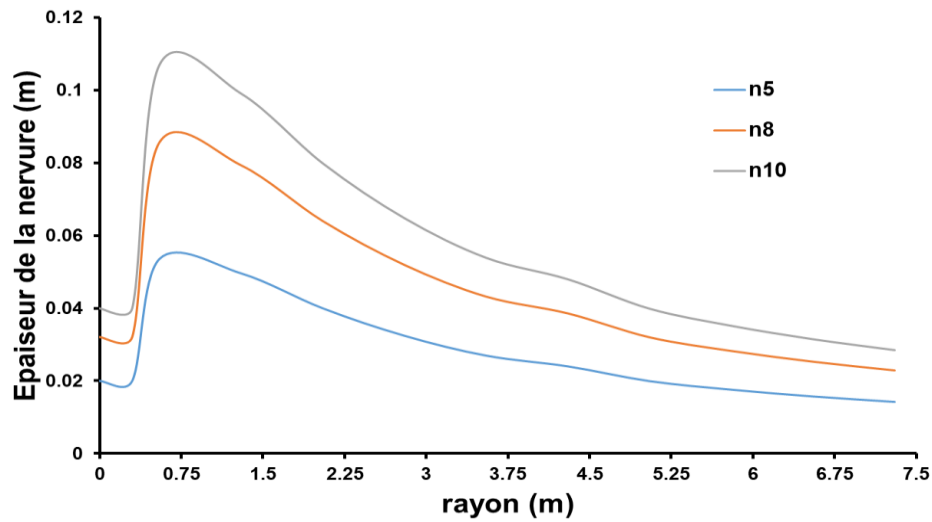


Figure 37 : Les distributions d'épaisseurs de la nervure proposées.

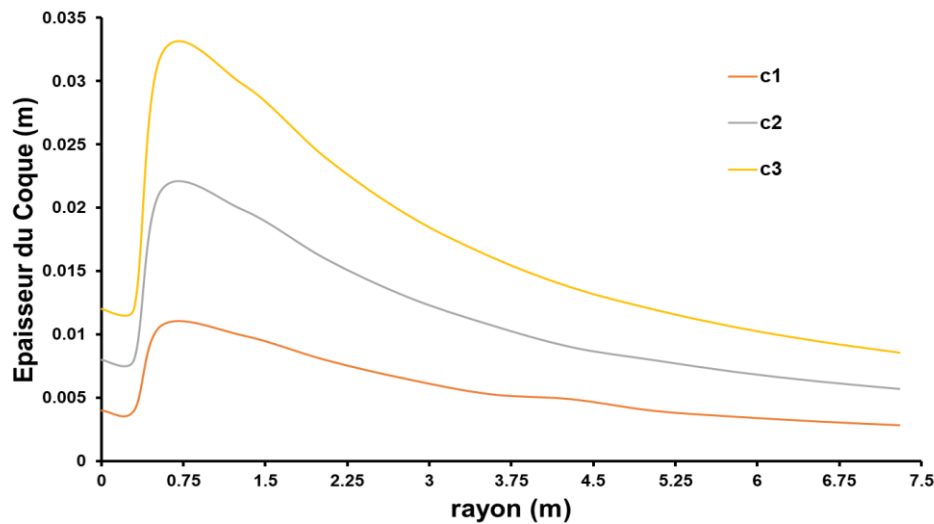


Figure 38 : Les distributions d'épaisseurs des coques proposées.

Les figures (37-38) présentent les distributions d'épaisseur de la coque et de la nervure de la pale estimées pour déterminer la meilleure forme de la pale. Nous avons combiné tous les cas de coques avec les cas de la nervure, nous avons obtenu 9 motifs de pale. L'analyse structurale est faite par le logiciel Qblade. Cette analyse est concentrée sur les cas extrêmes (figure 39-40). Le cas de vitesse maximale (16m/s) ou l'effet de décrochage est presque au long de la pale avec un angle d'attaque plus de 15°. Ce phénomène met le dos de la pale sous pression plus élevée. L'autre cas est avec une vitesse minimale (3m/s) ou la pale tourne sous une pression normale de l'air plus élevée qui fait par le choc de l'air sur les pales qui ont une

vitesse de rotation constante. La remarque globale sur les résultats des contraintes équivalentes est la présence de deux zones critiques au long de la pale. La première est au pied de pale et l'autre à la section de 60% de la pale. Ces derniers expliquent que la partie de la jonction de la pale avec le moyeu de l'éolien met la pale dans le cas d'une poutre encastree. La deuxième section présente un deuxième encastrement virtuel ou l'absence de la nervure après cette section ce qui rend cette région faible.

Une autre remarque est la diminution de contrainte avec une augmentation de l'épaisseur de la nervure dans tous les cas. L'analyse de contraintes à 16m/s montre que la diminution de l'épaisseur de la coque est accompagnée d'une augmentation de contrainte.

L'analyse de contrainte à 3m/s montre les mêmes remarques à 16m/s mais avec des valeurs des contraintes plus faibles.

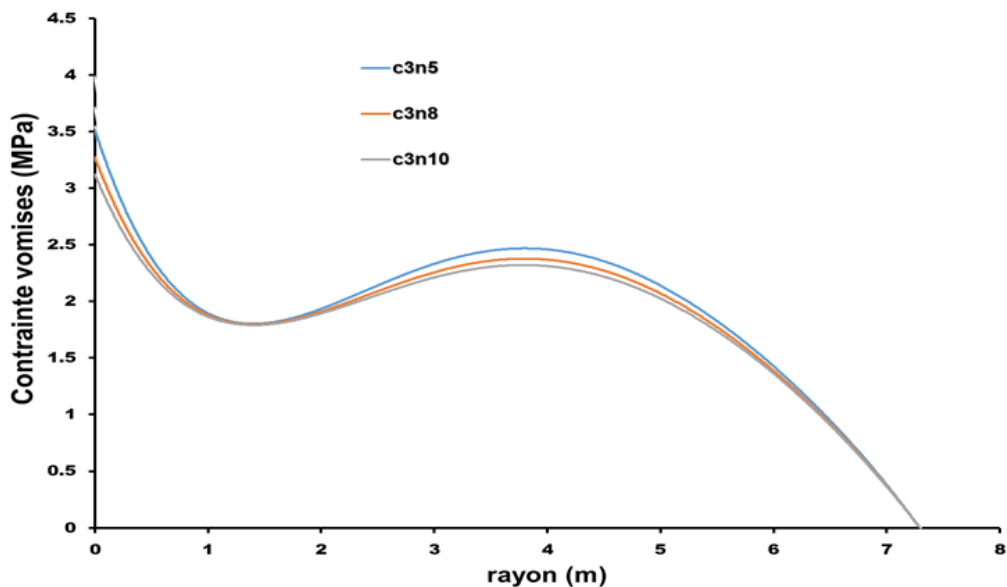


Figure 39: Les distributions des contraintes des modèles (c3nX) à 16m/s.

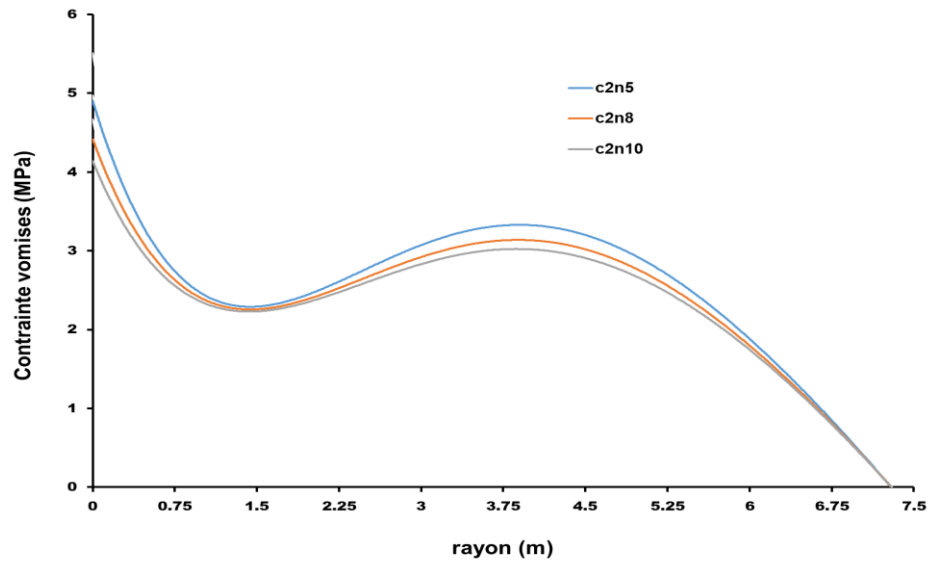


Figure 40 : Les distributions des contraintes des modèles (c2nX) à 16m/s.

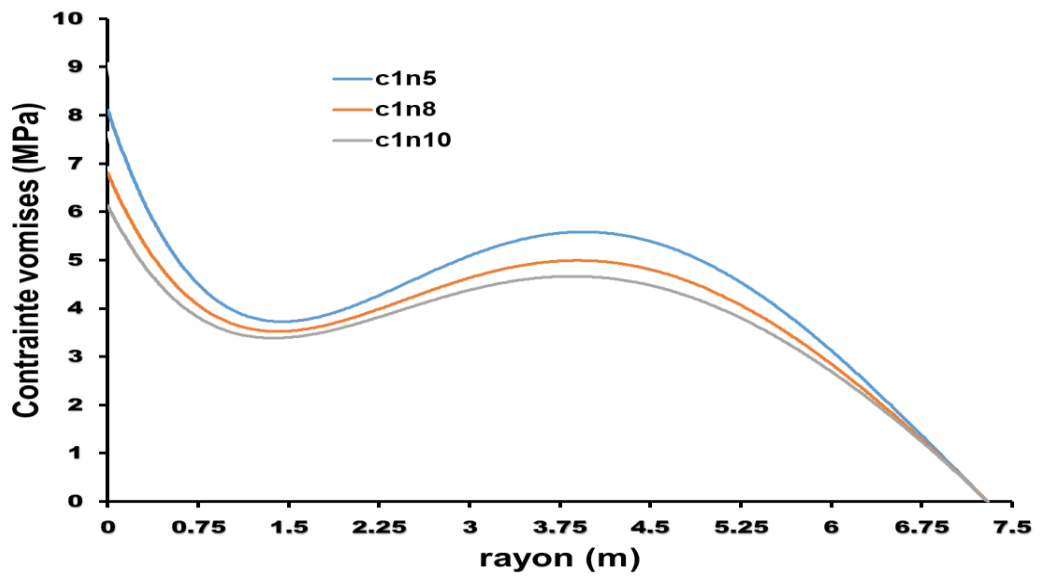


Figure 41 : Les distributions des contraintes des modèles (c1nX) à 16m/s.

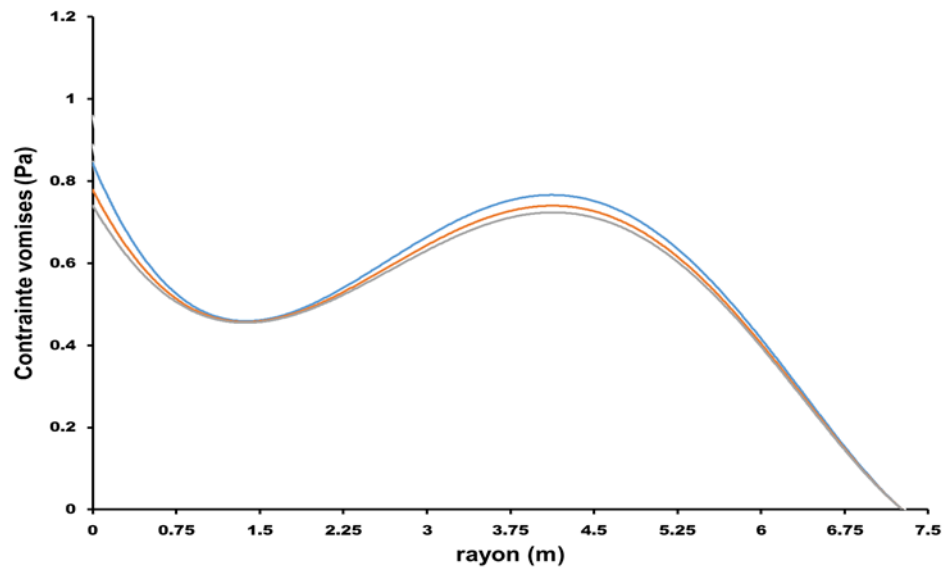


Figure 42 : Les distributions des contraintes des modèles (c3nX) à 3m/s.

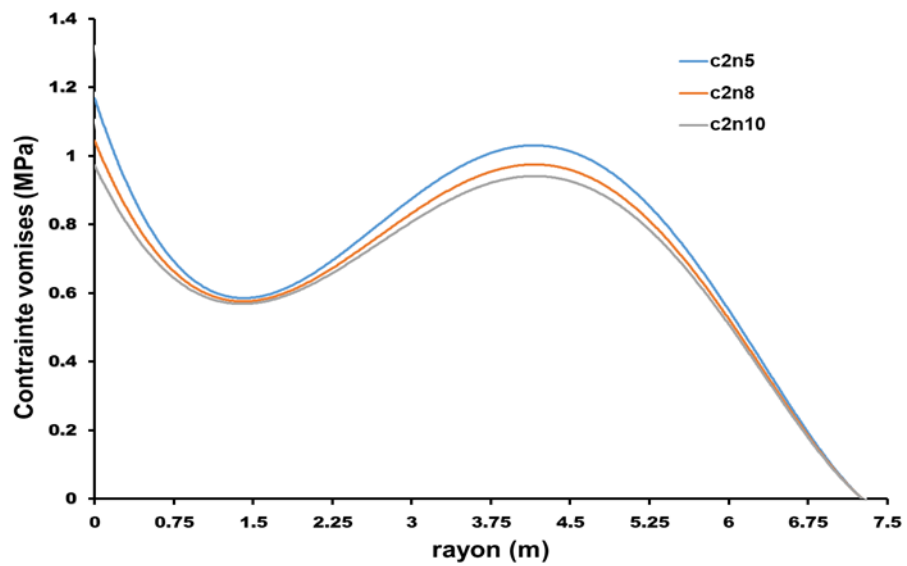


Figure 43 : Les distributions des contraintes des modèles (c1nX) à 3m/s.

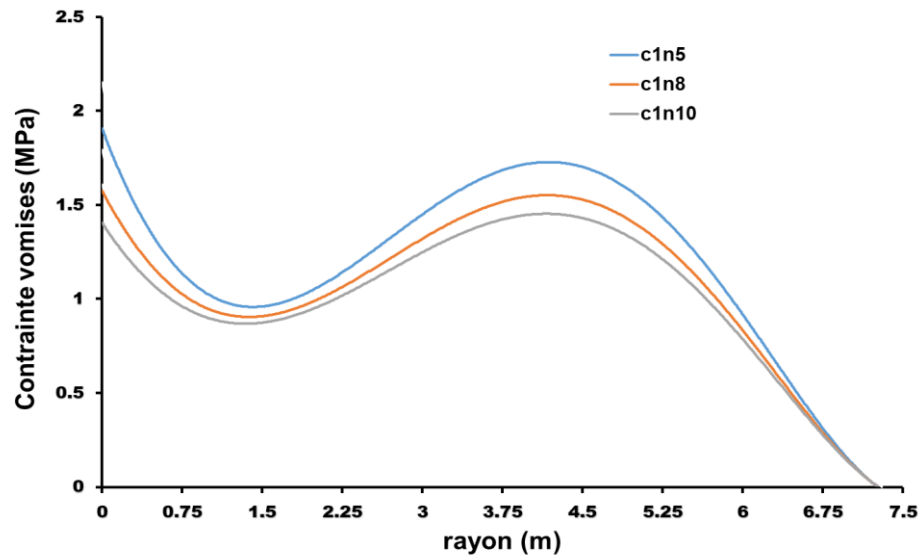
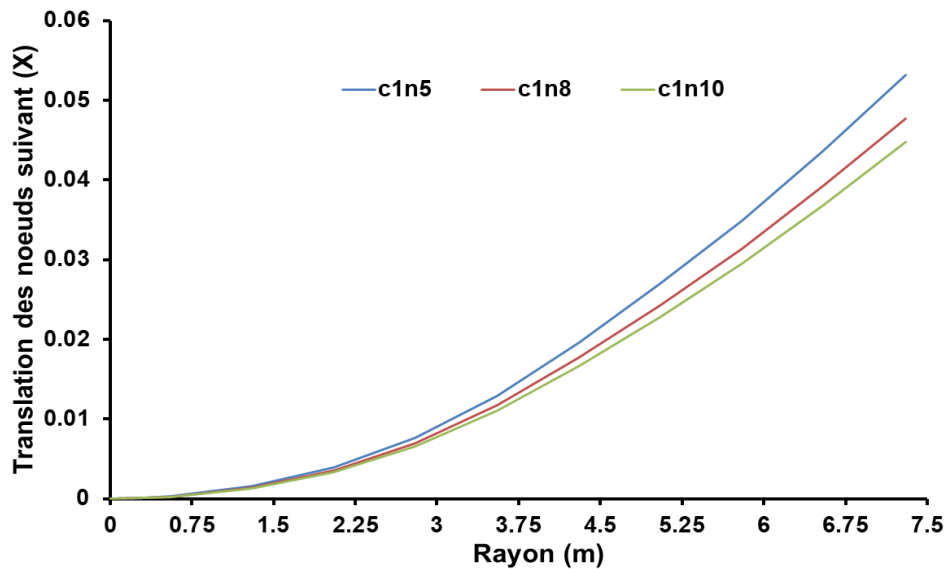


Figure 44 : Les distributions des contraintes des modèles (c1nX) a 3m/s.

En générale, Les figure (45 : 47) présentent la réaction de la structure de la pale sous les charges du vent avec 16m/s et 3m/s de la vitesse dans la direction (X, Z). Les résultats montrent des petites déformations des sections de la pale. Ces déformations sont plus proches dans les sections avec 60% de la longueur de la pale ou le maximum toujours dans la section de bout. D'autre part, la flèche est diminuée avec l'augmentation de l'épaisseur de la nervure et de la coque. Nous avons constaté que les déformations suivant (Z) est presque négligeable dans tous les modèles étudiés sont dans l'ordre de 1‰ des valeurs de la direction (X).



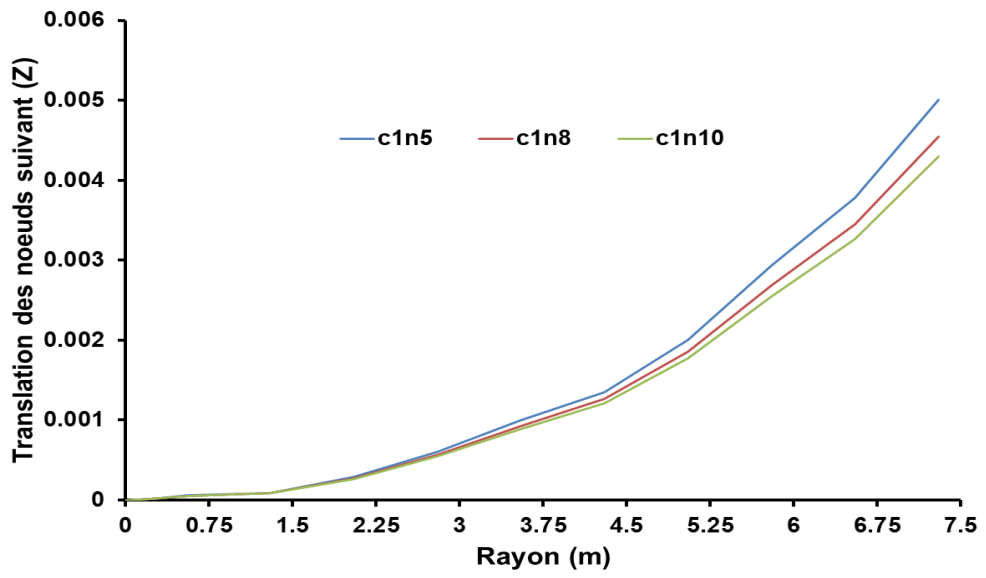
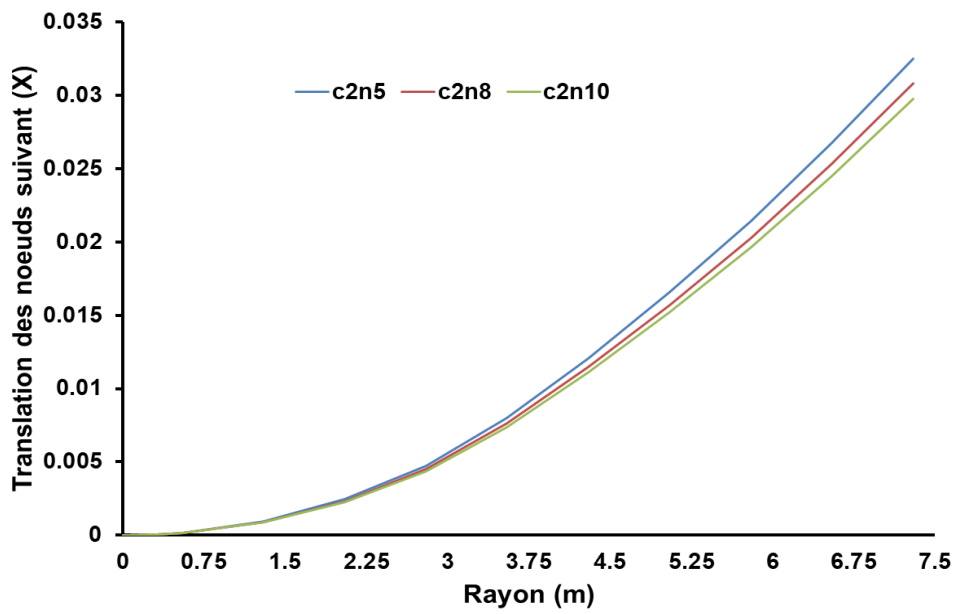


Figure 45 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c1nX) a 16m/s.



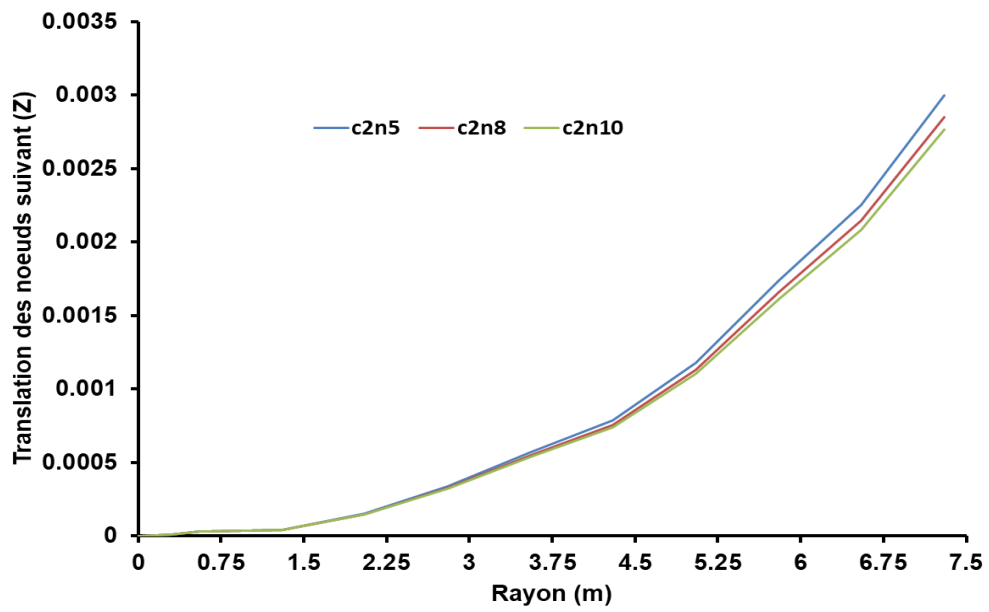
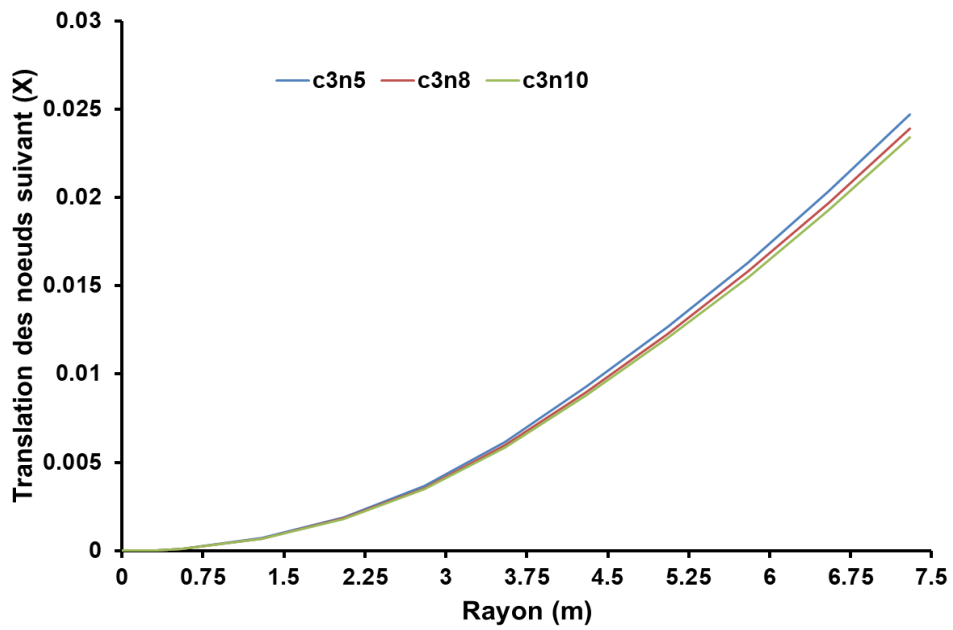


Figure 46 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c2nX) a 16m/s.



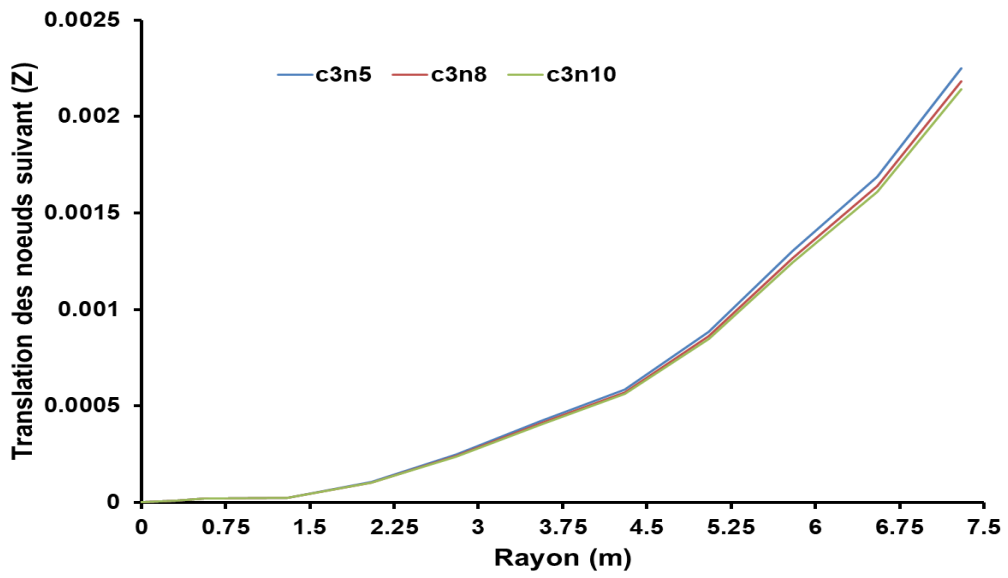
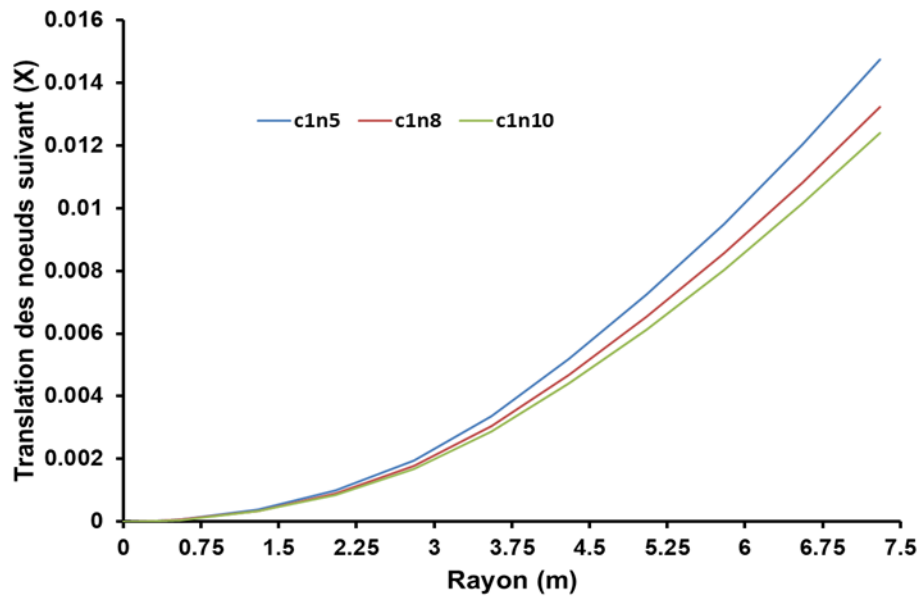


Figure 47 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c3nX) a 16m/s.



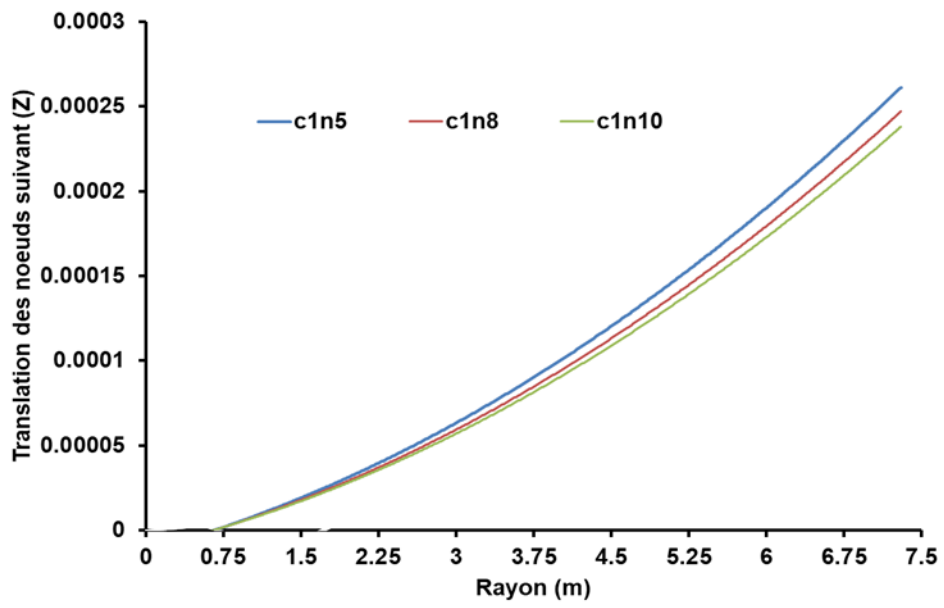
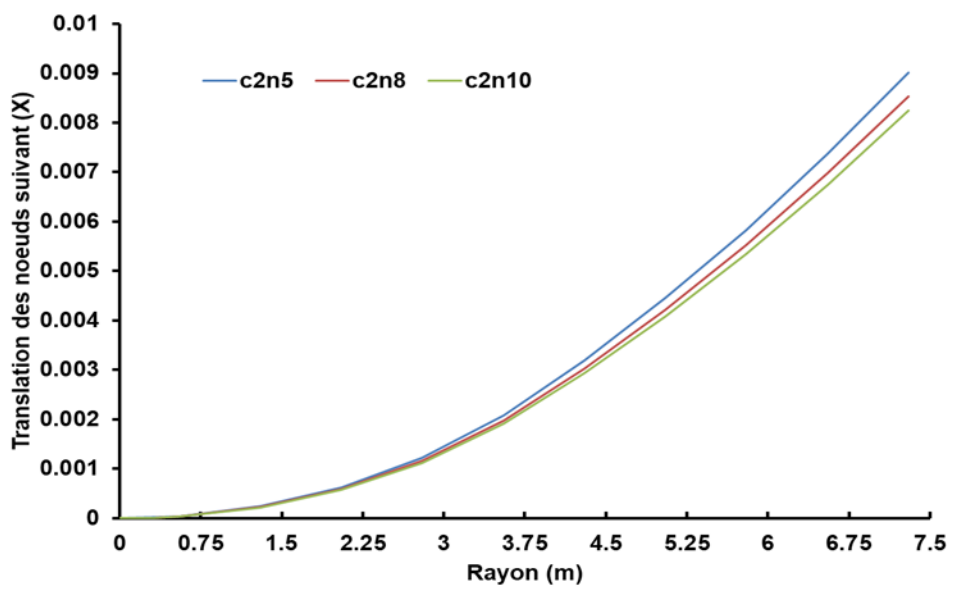


Figure 48 : La translation des noeuds suivant (X, Z) des modèles (c1nX) a 3m/s.



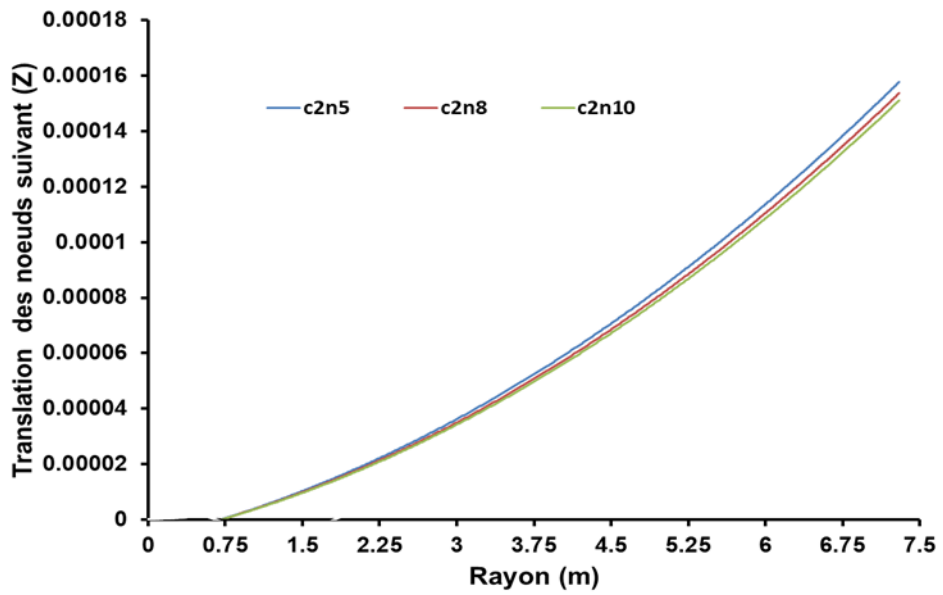


Figure 49 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c2nX) a 3m/s.

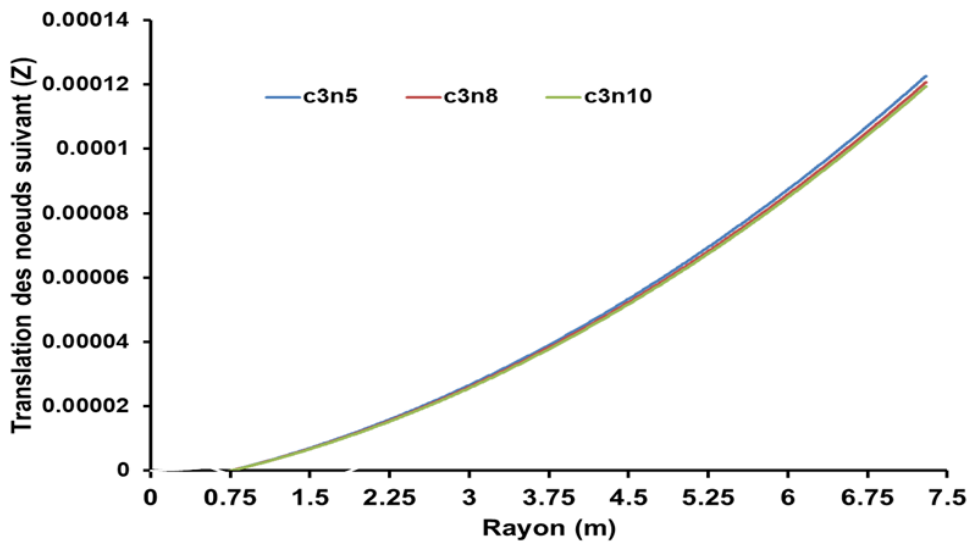
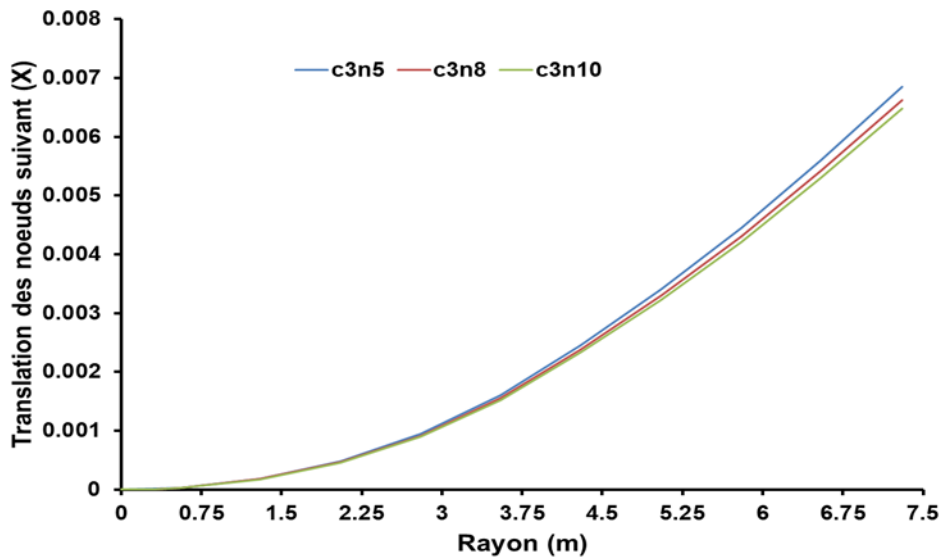


Figure 50 : La translation des nœuds suivant (X, Z) des modèles (c3nX) a 3m/s.

A la valeur de vitesse de 16m/s, l'analyse de l'effet de la nervure montrent que les valeurs de déformation deviennent presque identiques avec l'augmentations de l'épaisseur de coque. Nous avons comparé les valeurs de la section de bout de la pale. Ou dans la direction (X), ils ont un maximum de déformation de 0.058m enregistré avec le modelé c1n5, 0.03m avec le modèle c2n5 et 0.025 avec le modèle c3n5. Le maximum est toujours enregistré avec la nervure de 5% de longueur de la corde dans tous les modèle. Des mêmes remarques sont constatées dans la direction (Z) avec des valeurs de 1/10 des valeurs précédentes.

Les figure (48 :50) présentent les déformations de la pale sous les charges du vent de 3m/s, les résultats montrent que les valeur suivant (X) sont diminué par 3 fois par rapport aux valeurs enregistré a 16m/s. une valeur maximale de 0.015m a été enregistré avec le modèle de pale c1n5, 0.009m avec le modèle c2n5 et 0.007m avec le modèle c3n5. D'autre part, les valeurs enregistrés dans la direction (Z) ont étai négligeable.

Dans le cas global, le modèle d'épaisseur de coque 2% et 3% de la longueur de la corde sont les modèles qui ont la moindre déformation. En plus la valeur de la déformation enregistrée est convergente. Selon ce dernier et la statistique de poids de chaque modèle qui présenté dans le tableau (2), Les modèles avec épaisseur de coque de 2% de la longueur de la corde présentent des meilleurs résultats. Ou le modèle avec épaisseur de nervure de 8% de la longueur de la corde est le meilleur modèle de notre cas avec un poids de 259.85kg et une déformation maximale de 0.03m dans la direction (X) et 0.003 dans la direction (Z).

Tab. 2. Les poids des modèles de pale (kg)

Nervure Coques	1%	2%	3%
5%	145.52	240.6	326.9
8%	167.8	259.85	343.12
10%	182.52	272.55	353.81

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale :

L'amélioration ou l'optimisation de la performance des pales éoliennes est un palier plus complexe. Cette complexité dépend de comprendre plusieurs paramètres sachant que les paramètres aérodynamiques et les paramètres de conception. Dans ce travail, nous avons donné une démarche qui représente un premier pas d'étudier et d'essayer de définir d'une forme de pale optimale adoptée au site choisi. L'analyse a été faite par le logiciel Qblade qui est basé sur la théorie de dynamique d'élément de pale. Cette théorie présente le modèle mathématique principal utilisé dans l'étude de la performance des éoliens. Un modèle d'éolien à axe horizontal a été proposé. Ce modèle est de 40tr/min de vitesse de rotation avec une pale de 7.5m de profil NACA23015. Ce modèle est destiné pour l'installer à la zone de Biskra où la vitesse moyenne est égale 4.5m/s. Pour déterminer la forme de pale optimale, une étude de performance aérodynamique et structurale a été faite par le logiciel Qblade. Ou nous avons étudiés neuf motifs de pale éolienne avec différentes distributions d'épaisseur pour la partie coque et la partie nervure. Les résultats d'analyse aérodynamique montrent que ce modèle a une distribution de corde qui commence par 1.07m au pied de la pale et 0.28 m au bout. Le vrillage de la forme aussi commence par 32° au pied et termine par -1.6° au bout. Le coefficient de puissance maximal est égal à 0.46 avec une puissance nominale égale 20KW. L'analyse structurale donne des résultats assez proches du modèle avec pale de motif c2nX présentent les meilleurs modèles d'une face de résistance de déformation et poids dans le cas global. Ou le motif de pale c2n8 présente le meilleur motif de pale avec résistance de déformation acceptable et poids moyen de 259.85kg.

Références Bibliographiques

[1] : Mlle. ZERARI NAZIHA "Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille" Université Badji- Mokhtar Annaba 2015

[2] : M. Debbache "De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites" Université Mohamed Khider – Biskra

[3] : A.BELGUIDOUM "Les aspects technologiques des éoliennes et leur utilisation dans la production d'énergie dans les zones arides" Université Mohamed Khider – Biskra

[4] : Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2009 – 41 "Dimensionnement d'une installation éolienne et modélisation informatique d'une pale d'éolienne"

[5] : C.Masson "Wind technology", Department of Mechanical Engineering, Ecole de technologie supérieure SYS84, 2011.

[6] : K. FERKOUS, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Université Mentouri Constantine, 2009.

[7] : Axenne, « petit éolien » Usages raccordés au réseau, conseil général des Landes, 2008

[8] : H.Fatmaoui, « Eléments de base de l'aérodynamique des pâles d'éoliennes » Université Ibn Zohr Faculté des sciences, Maroc.

[9] : I. Graham, L'énergie éolienne : les énergies en questions, 2000.

[10] : B. Lester and R. Brown, "Le développement de l'éolien dans le monde," France énergies éoliennes, Global Wind Energy Council (GWEC), 2011.

[11] : C.W. Pereira, « L'énergie éolienne Principe de fonctionnement », développement viable Mai ,2006.

[12] : O. Guerri « L'Energie éolienne en Algérie: Un bref aperçu », Centre de Développement des Energies Renouvelables Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 2011.

(13) : [BOY06] A. BOYETTE, « Contrôle, commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1, Décembre 2006.

(14) : Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2009 – 41 (dimensionnement d'une installation éolienne et modélisation informatique d'une pale d'éolienne)

(15) : L. Bouchaour, "Etude d'un écoulement incompressible autour d'un profil tournant," Univ.Mentouri Constantine, 2011.

(16) ; Meklid M.T., M. Agli F., Mémoire de PFE 'Les paramètres aérodynamique dans la conception de forme optimale d'éolienne', Université de Biskra, 2010.

(MM) : Mr. KHELLADI SMAINE (ANALYSE ET APPROCHE D'AIDE A LA DECISION POUR LE CHOIX

D'UN PROJET EOLIEN)

[17] : https://eolienne.f4jr.org/systeme_de_regulation_et_de_protection

[18] :D. L. Gourières, Les éoliennes : Théorie, conception et calcul pratique, 2ème ed. Moulin Cadiou, 2008.

[19] : C. N. EBÉY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à piston simple effet ", Université Kinshasa, 2005.

[20] : Le Gourières (G), Livre énergie éolienne, théorie conception et calcul pratique des Installations, édition EYROLLES, 1980 et 2008.

[21] : Généralité sur les matériaux composites, École Centrale de Nantes -2011.

[22] : X.Tang, Aerodynamic design and analysis of small horizontal axis wind turbine blades, PhD thesis, University of Central Lancashire, Preston, UK, 2012.

[23] : Data des profile '<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca23015-il>'-2019.

[24] : le logicielle Qblade '<http://www.q-blade.org/>'-2019

[25] : Manueled'utilisationQblade'[http://qblade.org/project_images/files/guidelines_v06\(1\).df](http://qblade.org/project_images/files/guidelines_v06(1).df)

Résumé

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent transformée en énergie mécanique puis en énergie électrique à l'aide un aérogénérateur. Le vent ne peut assurer un apport énergétique régulier sans l'optimisation de l'aérodynamique des pales. Dans ce travail de projet de fin d'étude. Une recherche bibliographique a été accompli pour positionner les défis liés a la modélisation de l'aérodynamique des pales. Ensuite l'aérodynamique d'une pale de l'éolienne a axe horizontale a été expliqué et les charges de l'aérodynamique exercé sur une pale ont été étudiés. Finalement les résultats de simulation sont illustrés.

ملخص

طاقة الرياح هي الطاقة الحركية للرياح التي تحولت إلى طاقة ميكانيكية ثم إلى طاقة كهربائية باستخدام مولد الهواء. لا يمكن للرياح ضمان إمداد منتظم بالطاقة دون تحسين الديناميكا الهوائية للشفرات. في هذه الدراسة نهاية العمل المشروع. تم الانتهاء من البحث الأدب لتحديد التحديات المتعلقة بنمذجة الديناميكا الهوائية للخوادم النصلية. بعد ذلك تم شرح الديناميكا الهوائية لشفرة توربينات الرياح ذات المحور الأفقي وتمت دراسة كميات الديناميكا الهوائية التي تمارس على الشفرة. وأخيرا يتم توضيح نتائج المحاكاة .

Abstract

Wind energy is the kinetic energy of wind transformed into mechanical energy and then into electrical energy using an aerogenerator. The wind can not ensure a regular energy supply without optimizing the aerodynamics of the blades. In this end of study project work. A literature search was completed to position the challenges related to blade aerodynamics modeling. Then the aerodynamics of a horizontal axis wind turbine blade were explained and the loads of aerodynamics exerted on a blade were studied. Finally the simulation results are illustrated.