

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique
PROJET DE FIN D'ETUDE
En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Techniques de production industrielle

Présenté par :

BELOUDAH Lahoual & AOUADJ Youssef

Thème

**ETUDE DE LA FORMATION DE FISSURES SUR UNE PALE
D'UNE EOLIENNE SOUS L'INFLUENCE DES CHARGES
DYNAMIQUES**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
AISSI Adel	MCA	Encadreur
ZERNADJI Sid Ali	Doctorant	Examineur
MOUSSAI Ahmed Toufik	MAA	MAA

Année Universitaire : 2022/ 2023

♥*Je dédie ce travail à ...* ✍

A ma très chère mère

*La source de mes efforts, qu'elle sera toujours ma merveille quand je ne suis pas à la hauteur ma très chère mère **Razika**, la lumière de ma vie qui m'a encouragé à aller de l'avant que dieu lui garde dans son vaste paradis*

A ma sœur et mon frère : Marwa et Abdessamed

L'équipe de l'encouragement et la flamme de compassion que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A toute la famille « Dilmi »

Mes tantes et mes oncles et toute ma famille

A toutes mes amies

Qui m'encouragent et mes amis d'étude mes camarades de la promotion de

Mécanique technique de production industrielle.

*Sans oublier mon binôme **Youssef** pour son soutien, son patience et son compréhension tout long de projet.*

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah pour la santé et le bien-être de m'avoir donné l'occasion et la volonté et le pouvoir d'établir et de terminer ce travail

Je tiens à remercier sincèrement mon encadreur Zerguene said à son aide et son soutien par tous ses efforts et ses conseils ; s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail..... Merci à tous

Liste des figures

Figure I.1. Procédure de production d'énergie éolien..... 4

Figure I.2. Éoliennes à axe horizontal..... 4

Figure I.3. Éoliennes à axe vertical 5

Figure I.4. les composantes de l'aérogénérateur..... 7

Figure I.5. La capacité mondiale installée en MW depuis 1980 10

Figure I.6. La croissance de la capacité mondiale installée entre 2013 et 2019 en MW..... 10

Figure I.7. Photo satellite de la ferme éolienne implanté à Adrar..... 12

Figure I.8. La vitesse moyenne du vent en Algérie estimée à 10 m du sol..... 13

Figure I.9. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne du vent annuelle à 10 m du sol..... 13

Figure I.10. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol. (Hiver et automne)..... 14

Figure I.11. Traversée d'un capteur de surface S par un fluide 19

Figure II.1. Les conditions aux limites pour l'analyse de la pale..... 25

Figure II.2. Maillage 3D de la pale en Aluminium par éléments finis 3D..... 26

Figure II.3. Les différentes pièces de fixation..... 26

Figure II.4. Structure de la pale complète 27

Figure III.1. Courbes de vitesse du vent en fonction de la hauteur et de la longueur de Monin-Obukhov, pour $u(z = 10 \text{ m}) = 3, 6, 9 \text{ et } 12 \text{ m/s}$ et $0 \leq z \leq h$ 29

Figure III.2. Courbes de vitesse du vent en fonction de la hauteur et de la longueur de Monin-Obukhov, pour $u(z = 10 \text{ m}) = 3, 6, 9 \text{ et } 12 \text{ m/s}$ et $0 \leq z \leq 200 \text{ m}$ 29

Figure III.3. 1^{er} mode de vibration (Flexion autour de l'axe X) 33

Figure III.6. 4^{eme} mode de vibration (Flexion autour de l'axe X) 33

Figure III.7. 5^{eme} mode de vibration (Flexion autour de l'axe X) 34

Liste des tableaux

Tableau I.1. Stations dont les vitesses de vent ont été publiées dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M.....	15
Tableau III.1. Les types de paysage et leurs longueurs de rugosité (Kishore, 2010 ; Wiki Éolienne, 2016)	30
Tableau III.2. Fréquences propres de la pale	35

SOMMAIRE

Table des figures	i
Liste des Tableaux.....	ii
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. GENERALITES SUR UN SYSTEME EOLIEN.....	3
I.1.1. Historique de l'éolien	3
I.1.2. Définition de l'éolienne	3
I.1.3. Les différents types d'éoliennes	4
I.1.3.1. Eoliennes à axe horizontal	4
I.1.3.2. Eoliennes à axe vertical	5
I.1.3.2.1. Eoliennes de Darrieus	6
I.1.3.2.2. Eoliennes de Savonius	6
I.1.3.2.3. Eoliennes de cyclo turbines	6
I.1.4. Principe de fonctionnement	6
I.1.4.1. Constitution d'une éolienne	7
I.1.4.2. Les matériaux utilisés	8
I.1.4.2.1. Les matériaux utilisés pour la construction des pales	8
I.1.4.2.2. Matériaux utilisés pour la construction de la tour d'une éolienne	9
I.1.5. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	9
I.1.5.1. La capacité mondiale installée.....	9
I.1.5.2. L'énergie éolienne dans l'Algérie.....	11
I.1.6. Avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne	15
I.1.6.1. Les avantage.....	15
I.1.6.2. Les inconvénients.....	16
I.2. INFLUENCE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES SUR L'ENERGIE EOLIENNE.....	16
I.2.1. Types de vent	17
I.2.1.1 Caractéristiques du vent.....	17

I.2.1.1.1. Variabilité temporelle	17
I.2.1.2.2. Variabilité spatiale	17
I.2.2. Types de vent Distribution verticale de la température et la pression	18
I.2.3. Théorie de Betz	19
I.3. CHARGEMENTS SUR UNE STRUCTURE EOLIENNE	20
I.3.1. Sources des chargements sur une pale d'éolienne	20
I.3.2. Influence de la taille de l'éolienne sur les chargements.....	21

CHAPITRE II.

MODELISATION

II.1. THEORIES.....	22
II.1.1. Théorie de l'analyse modale.....	22
II.1.2. Simulation modale de la pale.....	24
II.1.2.1. Choix des matériaux de construction.....	24
II.1.2.2. Conditions aux limites	25
II.1.2.3. Maillage volumique de la pale	25
II.1.2.4. Construction des pièces de fixation de la pale.....	26
II.1.2.5. Assemblage la pale	27

CHAPITRE III.

ANALYSES ET RESULTATS

III.1. MODELISATION DE LA VITESSE DU VENT	28
III.1. 1. Profil de vitesse du vent	28
III.2. MODES PROPRES ET LES FREQUENCES PROPRES	31
CONCLUSION GENERALE	36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Résumé - ملخص

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre du développement durable, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables face au double défi planétaire de l'épuisement imminent des ressources énergétiques fossiles et des préoccupations environnementales.

L'énergie renouvelable (ou EnR) fait référence à un ensemble de méthodes de production d'énergie à partir d'une source ou d'une ressource théoriquement illimitée qui peut être utilisée indéfiniment, ou qui peut être reconstituée plus rapidement qu'elle ne peut être consommée.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle, la géothermie et la biomasse. Ces ressources sont pratiquement inépuisables et propres et s'opposent à cet effet aux énergies fossiles.

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Au début, cette énergie n'était utilisée que dans le domaine mécanique. L'exemple le plus célèbre est le moulin à vent utilisé par les meuniers pour transformer le blé en farine. On peut citer les nombreux moulins à vent utilisés pour assécher les polders en Hollande [1].

Cette énergie est ensuite utilisée pour produire de l'électricité. Au XVIe siècle, il était utilisé pour pomper de l'eau et couper du bois de chauffage [2].

En 1891, le Danois Paul La Cour construit pour la première fois une éolienne pour produire de l'électricité [3]. Avec la fabrication des premières éoliennes, les améliorations de la technologie éolienne depuis les années 1990 ont permis de construire des éoliennes supérieures à 5 MW, et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours.

Donc, l'énergie éolienne peut être convertie en énergie mécanique pour en énergie électrique par l'utilisation de générateurs appropriés. Cette forme de conversion s'est considérablement développée dans le monde, aussi bien à travers des applications domestiques ou bien industrielles en connexion avec de puissance électrique

Notre structure de mémoire est la suivante : Le document est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre procède à un examen bibliographique du sujet. Une étude bibliographique de l'histoire du développement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne et des concepts physiques régissant leur fonctionnement est présentée. Différents types d'éoliennes à axe

vertical ou horizontal sont présentés et leurs caractéristiques techniques sont également révélées. Les statistiques présentées montrent l'évolution de la production et de la consommation d'énergie éolienne dans le monde, sans oublier l'Algérie.

Le second chapitre est dédié à la modélisation et la commande de la partie mécanique de la chaîne éolienne.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus à partir de l'application de la modélisation utilisée au cours du chapitre II ainsi que leurs analyses.

Enfin, Une conclusion générale qui confronte l'ensemble des résultats obtenus.

CHAPITRE I.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisées par l'humanité. C'est une énergie renouvelable favorisant la diversification et l'indépendance énergétique. C'est une énergie propre qui ne produit pas de gaz à effet de serre. Elle utilise des machines dont le cycle de vie est favorable au respect de l'environnement.

Dans Ce chapitre on va rappeler quelques notions essentielles sur l'énergie éolienne, en faisant une description générale sur différents types d'éolienne ses avantages et inconvénients. Des détails sur la constitution d'une éolienne et les différents composants de la chaîne de production de cette énergie.

. Ces études nous permettent de mieux interpréter les résultats expérimentaux de notre étude.

I.1. GENERALITES SUR UN SYSTEME EOLIEN

I.1.1. Historique de l'éolien

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, outre l'énergie du bois, la première chose que l'homme utilise est l'énergie éolienne. Depuis l'Antiquité, il a été utilisé pour propulser des navires, puis des moulins à blé et des bâtiments permettant de pomper l'eau. Dans la période précédant la révolution industrielle, l'énergie éolienne était la principale source d'énergie en Europe. Cependant, juste après cette période, avec l'invention des moteurs à vapeur et à combustion interne et l'avènement de nouvelles façons de produire de l'énergie, l'utilisation de l'énergie éolienne a considérablement diminué. Au XXe siècle, pendant des décennies, l'utilisation de l'énergie éolienne s'est limitée à produire de l'électricité dans des endroits éloignés plutôt qu'à être connectée au réseau.

I.1.2. Définition de l'éolienne

Une éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ils sont souvent utilisés pour produire de l'électricité et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables. La représentation de la Figure I.1 donne un modèle de petit réseau caractérisé par la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique [4].

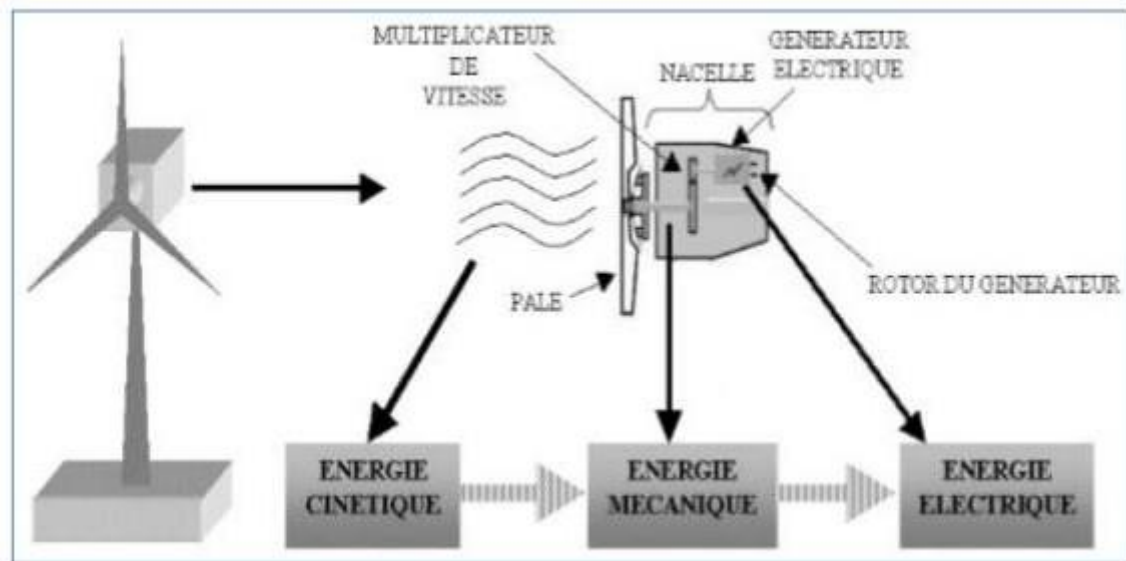


Figure I.1. Procédure de production d'énergie éolien [1].

I.1.3. Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles :

- Les aérogénérateurs à axe horizontal
- Les aérogénérateurs à axe vertical [5]:

I.1.3.1. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées. Ils sont basés sur le modèle du moulin à vent : l'hélice contient deux ou trois pales, qui tournent de manière aérodynamique. Il existe aussi des éoliennes mono pales horizontales, mais elles sont très rares. Les éoliennes bipales fonctionnent sur le même principe que les éoliennes tripales. Les éoliennes à axe horizontal sont plus efficaces que les éoliennes à axe vertical, elles sont également plus solides et moins chères à fabriquer.



Figure I.2. Éoliennes à axe horizontal

I.1.3.2. Eoliennes à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et ont été les premières structures développées pour la production d'électricité. Ils ont l'avantage que les commandes et le générateur sont au niveau du sol et donc facilement accessibles. Ils conviennent à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositifs directionnels. Deux d'entre eux se distinguent particulièrement : Savonius et Darrieus. L'éolienne Savonius se compose essentiellement de deux demi-cylindres avec des axes décalés l'un par rapport à l'autre. Comme une machine à palettes, il utilise essentiellement la résistance pour tourner. Cette machine a deux avantages : - Simple à fabriquer - Elle démarre les œufs avec une vitesse de vent de l'ordre de 2 m/s. L'éolienne inventée par le Français Darius est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un batteur à œufs. Cette machine est idéale pour l'alimentation. Malheureusement, ça ne démarre pas tout seul. Cette machine, qui peut fournir la plus forte puissance, n'a pas connu l'évolution technique qu'elle aurait dû avoir en raison de la fragilité du mécanisme, encore difficile à maîtriser. Cependant, avec d'autres efforts de recherche dans ce domaine, ce problème devrait être résolu.



Figure I.3. Éoliennes à axe vertical.

On peut lister trois grandes familles d'éoliennes à axe vertical :

I.1.3.2.1. Eoliennes de Darrieus

Équipé de pales profilées, comme les ailes d'avions (NACA). L'aérodynamisme des pales crée de la portance, tout comme les ailes ou les hélices d'avion. Ce système peut diriger la force de portance de la lame dans le sens du mouvement mécanique de la lame, générant ainsi un travail mécanique. L'aérodynamisme des pales est performant et nécessite la maîtrise de l'aérodynamique moderne. [6]

I.1.3.2.2. Eoliennes de Savonius

Livré avec deux coques rondes et emboîtables. Les pales créent une traînée différente selon qu'elles sont sous le vent ou sous le vent. Ce changement de résistance crée le couple qui entraîne l'éolienne. De conception plus simple, les machines étaient moins performantes et le rendement de ces machines était encore très limité. [7]

I.1.3.2.3. Eoliennes de cyclo turbines

Equipées d'un rotor dont certaines pièces sont mobiles, permettent d'orienter les pales en fonction de l'azimut de la pale. A la différence des 2 technologies précédentes [7].

I.1.4. Principe de fonctionnement

Les éoliennes convertissent l'énergie éolienne en électricité. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), le profil aérodynamique permet d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et de la convertir en énergie mécanique. Le flux d'air autour du profil crée une poussée qui entraîne le rotor et une résistance qui constitue des forces parasites.
- Au niveau du générateur, il reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, qui est ensuite transmise au réseau électrique [8].

I.1.4.1. Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments dont sont présentés dans la figure I.4:

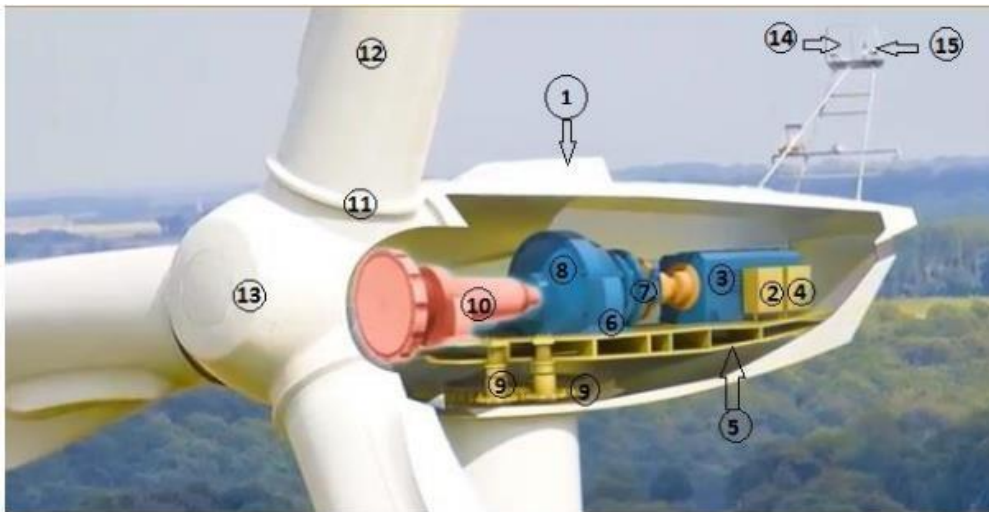


Figure I.4. Composantes de l'aérogénérateur.

- 1 : Nacelle
- 2 : Système de refroidissement.
- 3 : Génératrice
- 4 : Système de contrôle.
- 5: Armature métallique.
- 6 : Insonorisent.
- 7: Frein à disque.
- 8: Multiplicateur de vitesse.
- 9 : Servomoteurs.
- 10 : Arbre lent.
- 11 : Système d'orientation des pales.
- 12 : Les pales.
- 13 : rotor de la turbine
- 14 : Girouette.
- 15 : Anémomètre.

Lorsque la vitesse du vent est suffisante (3 à 5 m/s), l'anémomètre et la girouette fixés sur le toit de la nacelle informent l'automate pour signaler au moteur directionnel de faire face à l'éolienne face au vent. Le vent entraîne les pales qui font tourner l'axe lent. Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation et transfère cette accélération à l'arbre rapide, qui transfère le mouvement de rotation à un générateur qui produit de l'électricité. Le courant électrique qui en résulte descend jusqu'au sol par des câbles situés dans le puits de l'éolienne, qui est ensuite converti pour injecter dans le réseau existant [9].

I.1.4.2. Les matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour construire les différents éléments continus d'une éolienne doivent être soigneusement sélectionnés afin de répondre à toutes les exigences fonctionnelles. Parmi les facteurs influençant le choix du matériau nous avons :

- Les principales fonctions du fondation (mode d'appel d'offres, température d'utilisation, conditions générales d'utilisation). - Résistance (fissuration, abrasion, corrosion), conductivité électrique, etc

I.1.4.2.1. Les matériaux utilisés pour la construction des pales

Les techniques de fabrication et les matières exploitées pour les pales sont assez proches de ceux-là de l'aéronautique. Il persiste multiples genres de matériaux : Bois : Multiples types de bois sont utilisés pour produire des pales d'éoliennes, comme le hêtre, le pin et la chaux. Le bois possède une admirable douceur et finesse ainsi qu'une très bonne résistance à la faiblesse. Cependant sa facilité, le bois a une durée de vie faible en raison de sa attitude à l'humidité, c'est pourquoi un procédé d'imperméabilisation est utilisé pour interdire l'humidité d'entrer. Lamellé-collé : C'est un matériau conformé d'une globalité de lattes de bois collées en rapprochement pour une excellente résistance à la fatigue et permet la fabrication de pales de 5 à 6 mètres de long

Matériaux hétéroclites : Les matériaux composites ont de bonnes caractéristiques mécaniques et satisfont à de multiples nécessités telles que la douceur, la résistance à la corrosion et la fatigue mécanique, et sont généreusement exploités dans l'exploitation de pales d'éoliennes. Entre les divers genres de matières composites utilisés, on particularise ceux à base de fibres de verre et de résines polyester ou époxy, et ceux à base de fibres de carbone [10].

I.1.4.2.2. Les matériaux utilisés pour la construction de la tour d'une éolienne

Il existe deux genres de tours des grandes éoliennes - Tours en treillis : elles sont constituées par soudage de profilés d'acier - Tours des éoliennes modernes : tubulaires et coniques, fabriquées en acier par soudage de multiples petites sections coniques, coupées et laminées des revêtements en matière d'époxy sont utilisés pour pouvoir protéger les tours contre la corrosion [11].

I.1.5. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

I.1.5.1. La capacité mondiale installée [12]

La figure I.5 montre que les installations totales d'énergie éolienne ont augmenté régulièrement depuis 1980, atteignant 196630 mégawatts, dont 37642 mégawatt sont été ajoutés en 2010, soit un peu moins qu'en 2009. La capacité installée d'énergie éolienne dans le monde à la fin de 2018 atteint 597 gigawatts, avec 2018. a vu 50100 mégawatts ajoutés, soit un peu moins qu'en 2017, où 52552 mégawatts avaient été installés. 2018 a été la deuxième année consécutive de croissance des nouvelles installations, mais à un taux plus faible de 9,1%, après une croissance de 10,8% en 2017. L'année 2018 a été principalement caractérisée par une nouvelle dynamique caractérisée par: un marché européen de l'énergie éolienne en déclin, alors que la plupart des États européens, tels que l'Allemagne, l'Espagne, la France et l'Italie, ont connu un faible développement. Dans le même temps, la Chine, l'Inde, le Brésil, de nombreux autres marchés asiatique et certains pays africain sont connu une croissance solide, voire plus forte. La Chine, de loin le plus grand marché éolien, a installé une capacité supplémentaire de 21 gigawatts, de venant ainsi le premier pays avec plus de 200 gigawatts de capacité éolienne installée. Une capacité relativement modeste de 19 gigawatts a été installée en 2017, ce qui n'était pas très fort, mais qui s'est transformé en croissance. La Chine conserve sa position inattaquable de leader mondial de l'énergie éolienne, avec une capacité éolienne cumulée de 217 gigawatts. Le deuxième plus grand marché, les États-Unis, a vu les nouvelles capacités augmenter de 6,7 gigawatts en 2017 à 7,6 gigawatts en 2018, malgré des objectifs nationaux moins ambitieux en matière de climat et d'énergie. Cette tendance positive est certainement non seulement le résultat de l'économie de l'énergie éolienne, mais aussi d'un soutien solide et complet au niveau de l'État et des municipalités. Bientôt, les États-Unis seront le deuxième pays après la Chine à avoir atteint une capacité installée de plus de 100 Gigawatt.

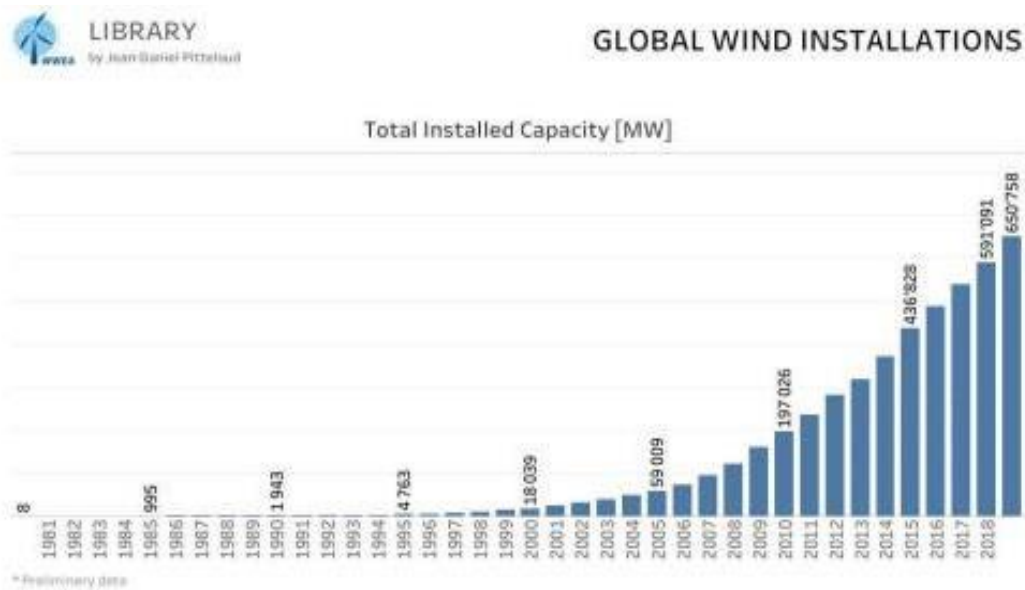


Figure I.5. La capacité mondiale installée en MW depuis 1980 [8]

Selon les statistiques publiées aujourd'hui par la World Wind Energy Association (WWEA), il y avait 59 667 mégawatts installés dans le monde à la fin de 2019, une augmentation significative par rapport à 2018, lorsque juste 50 252 mégawatts étaient installés. 2019 a été la seconde année la plus forte pour les éoliennes en termes de taille de marché, avec une croissance de 10,1 %, dépassant 2016 et 2017. Toutes les éoliennes installées d'ici fin 2019 pourraient fournir plus de 6 % de la demande mondiale d'électricité. [Figure 1.6]



Figure I.6. La croissance de la capacité mondiale installée entre 2013 et 2019 en MW.

La Chine et les États-Unis poursuivent leurs bonnes années avec une nouvelle capacité de 27,5 GW et 9,1 GW respectivement, la plus grande taille de marché au cours des cinq dernières années. Et surtout, la majeure partie du marché européen a souffert de mauvaises politiques et fait face à une forte baisse, notamment en raison de l'effondrement de l'ancien leader mondial l'Allemagne, qui n'a augmenté que de 2 GW contre 6,2 GW en 2017. Dans le webinaire, des experts d'Australie et du Brésil, de Chine, d'Allemagne, d'Inde, d'Italie, du Japon, de Corée du Sud, de la région du Maghreb, d'Amérique du Nord, du Pakistan, de Russie, de Turquie et de la région Mena d'Ukraine discuteront des marchés récents dans des régions clés du monde en 2019. Présenté une mise à jour sur les développements et les défis actuels. Tous les intervenants ont convenu que l'industrie mondiale de l'énergie éolienne connaîtra un ralentissement général sur la plupart des marchés, car la crise actuelle des coronavirus aura un impact mondial sur le développement du marché en 2020. Les perturbations de la chaîne d'approvisionnement internationale et les restrictions nationales de verrouillage entravent le secteur éolien comme la plupart des autres industries [12].

I.1.5.2. L'énergie éolienne dans l'Algérie

Les réalisations dans les milieux des énergies renouvelables, en particulier l'énergie éolienne, sont très limitées par rapport aux développements mondiaux actuels dans ce domaine et le domaine a atteint des objectifs très élevés. L'utilisation de cette source d'énergie est actuellement limitée aux éoliennes (moteurs d'avions) installées à Adrar pour le pompage de l'eau. [13] Pour un succès futur, le projet de parc éolien de Tindouf d'une capacité de 10 MW a récemment été mis en appel d'offres. Ce projet hybride combinera le diesel et l'énergie éolienne pour produire de l'électricité (6 MW éolien et 4 MW diesel) [14]. Trois autres démarches de parcs éoliens de 10 MW chacun seront commencés dans le sud du pays. Ces perspectives s'inscrivent dans un programme de développement des énergies renouvelables approuvé par la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG). L'objectif est d'augmenter la part des énergies renouvelables dans le bilan électrique domestique à 5-6% entre 2010 et 2015. Ce chiffre semble ambitieux si l'on considère que le ratio actuel n'est que de 0,02 %, soit moins de 5 GWh. Ce pourcentage est très faible même par rapport aux pays voisins.[15]

L'utilisation des énergies renouvelables est essentielle pour le développement durable, en particulier dans le sud algérien, car il est très coûteux de se connecter au réseau en raison de la grande répartition de la population dans cette vaste zone. La consommation d'électricité en Algérie a augmenté de 4 % par an ces dernières années et la demande d'électricité devrait augmenter de 7 % par an à long terme. La croissance de la demande a provoqué des

perturbations importantes dans la distribution d'électricité au cours des dernières années. L'Algérie est dans une nouvelle phase de déploiement des énergies renouvelables et prévoit d'atteindre près de 40% de sa production d'électricité à partir de sources renouvelables d'ici 2030. Le choix de l'énergie solaire est le plus important, tandis que l'éolien représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'envisager la possibilité de construire un parc éolien dans une zone particulière, il est nécessaire de réaliser une étude d'aménagement éolien afin d'obtenir une connaissance précise de la météorologie éolienne. C'est pourquoi plusieurs chercheurs de l'EPST CDER se sont concentrés depuis plusieurs années sur l'élaboration de cartes des vents pour l'Algérie. [16].



Figure I.7. Photo satellite de la ferme éolienne implanté à Adrar [16]

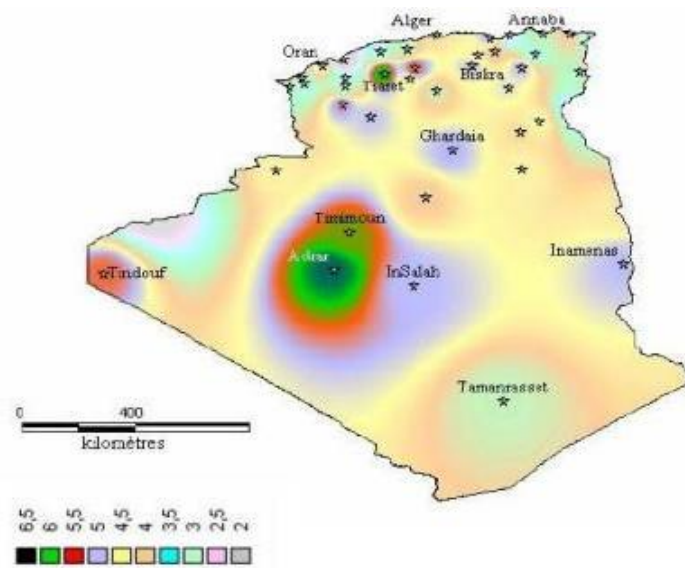


Figure I.8. La vitesse moyenne du vent en Algérie estimée à 10 m du sol [16]

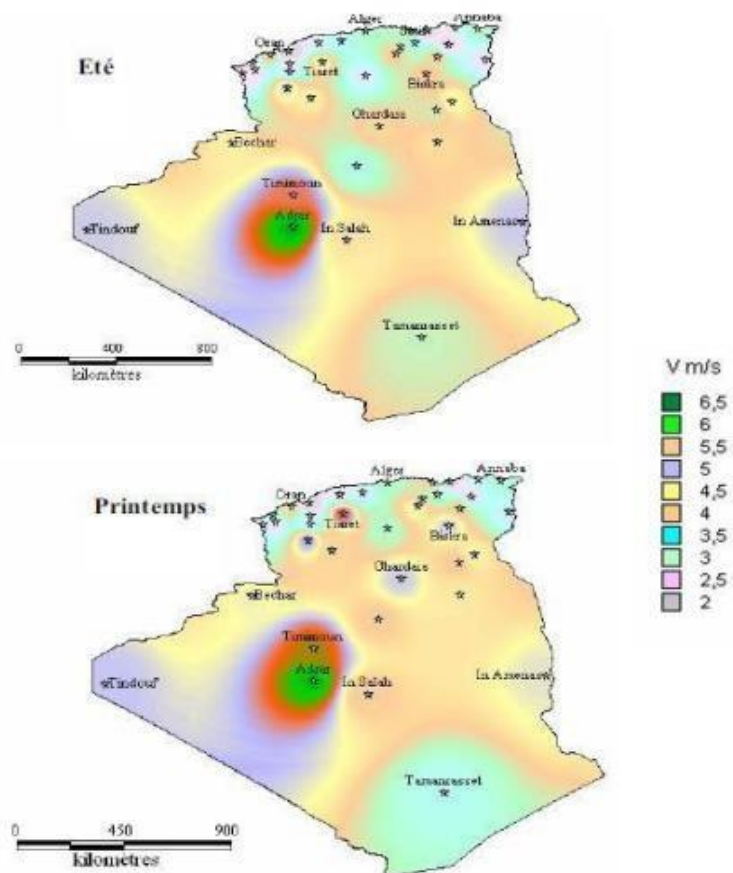


Figure I.9. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne du vent annuelle à 10 m du sol [16]

Utilisant la même palette de couleurs, l'atlas de la mousson algérienne est représenté sur la Figure I.9 (été et printemps) et (hiver et automne) sur la Figure I.10. En général, vous constaterez que les périodes d'été et de printemps sont plus venteuses que les autres périodes de l'année. Tous les atlas établis présentent le sud-ouest, c'est-à-dire les régions d'Adrar, Timimoune et Insalaar, comme les régions les plus venteuses, à l'exception de l'atlas d'hiver, qui présente le microclimat de Tiaret avec les vitesses de vent les plus élevées. . plus grand que.

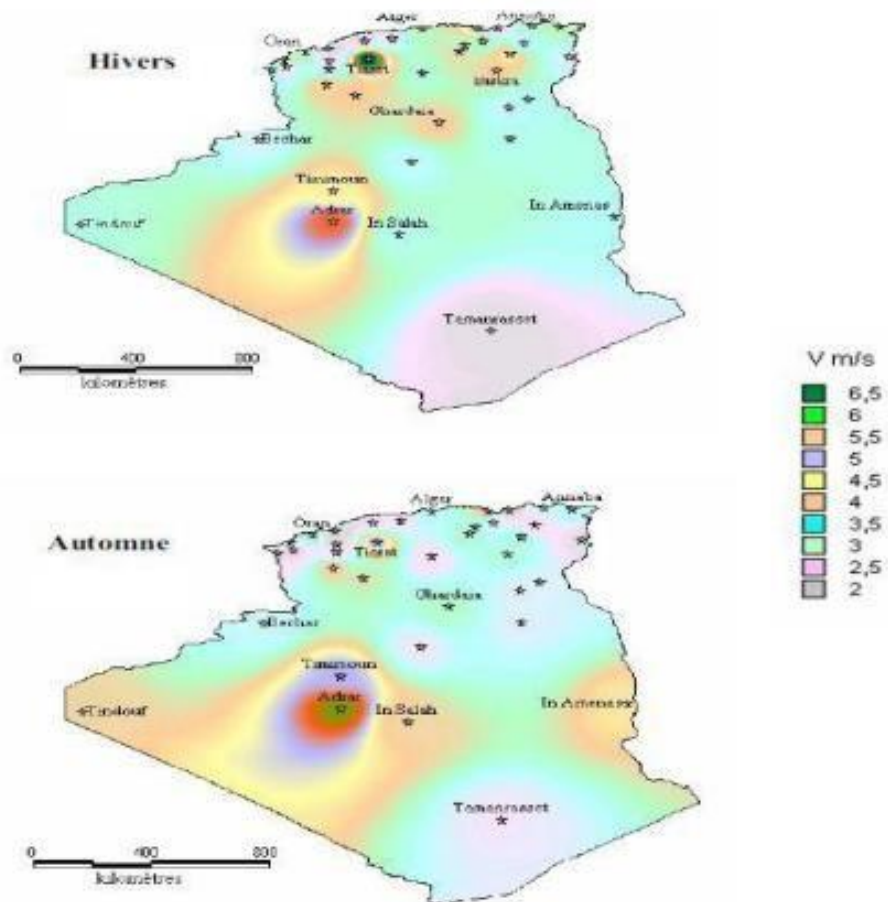


Figure I.10. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m du sol. (Hiver et automne).

Tableau I.1. Stations dont les vitesses de vent ont été publiées dans l'Atlas Vent produit par l'O.N.M

Wilaya	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (deg)	Vitesse du vent (m/s)
Adrar	0.28	27.82	0.01	5.9
Timimoune	0.28	28.29	0.01	5.1
Tiaret	1.47	35.37	0.02	4.7
Tindouf	-8.10	27.67	0.00	4.6
Ghardaïa	3.80	32.40	0.03	4.6

Dans le tableau I.1 nous avons les stations les plus éventées du pays, la plupart d'entre eux sont du sud su pays. On sait qu'une éolienne démarre avec une vitesse de vent minimal de 3.5m/s. Donc on peut dire que le sud du pays a un réel potentiel dans l'éolien comme on peut le voir a Adrar que le vent se lève a plus de 5.9 m/s c suffisent pour faire tourné le rotor [16].

I.1.6. Avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

Le développement et l'expansion de l'utilisation de l'énergie éolienne sont associés aux avantages de ce type d'énergie. Cependant, cette source d'énergie présente également des inconvénients qu'il convient d'étudier pour améliorer son utilisation. [17].

I.1.6.1. Les avantage

Une énergie propre infiniment durable qui ne nécessite pas de carburant.

- Pas de gaz à effet de serre, chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne réduit les émissions de CO2 émises lors de la production d'électricité de 0,8 à 0,9 tonne par an. source de chaleur. Aucun déchet toxique ou radioactif n'est généré.

La propriété individuelle et collective des éoliennes permet aux gens de participer directement à la protection de l'environnement.

- Selon EDF, l'éolien s'avère être un excellent complément aux autres énergies, notamment lors des pics de consommation comme l'hiver.

- L'énergie éolienne est une forme d'énergie économique. Avec les éoliennes, l'énergie peut être récupérée directement là où elle est utilisée, ce qui permet d'économiser tous les circuits de distribution.

I.1.6.2. Les inconvénients

- L'installation d'éoliennes nécessite divers critères (vents fréquents, surface suffisante, pas d'obstacles au vent, facilité d'accès, proximité du réseau électrique, considérations environnementales telles que les bâtiments historiques, etc.) sans restriction, éloignées de la résidence, avec ou sans autorisation administrative). ;

- Même si la superficie du terrain est petite, il faut 10 hectares pour construire un grand parc éolien. En effet, l'écart réglementaire entre les éoliennes est d'au moins 200m.

- La pollution visuelle, la pollution sonore et les interférences des ondes électromagnétiques (télévision, radio, communications mobiles) gênent l'installation chez les particuliers, obligeant à installer les éoliennes loin des bâtiments résidentiels.

- Les coûts de production font encore grimper le prix global des éoliennes.

- Cette énergie est propre, mais le coût énergétique pour la générer est très élevé.

- Les éoliennes offshore sont un atout important, mais en raison des pertes d'énergie sur les lignes de transmission, les installations éoliennes doivent être relativement proches du rivage (environ 10 km). [18].

I.2. INFLUENCE DES PARAMETRES METEOROLOGIQUES SUR L'ENERGIE EOLIENNE

Le vent n'est pas un flux constant d'énergie. Varie selon la saison, l'heure de la journée, l'altitude et le terrain. L'énergie éolienne est en fait de l'énergie solaire. En fait, le rayonnement solaire chauffe inégalement la surface de la terre, créant des zones de température, de densité et de pression variables. Le vent est le mouvement de l'air entre ces différentes zones. Premièrement, les vents planétaires existent parce que le mouvement de l'air transporte la chaleur des tropiques vers les régions polaires plus froides. D'autres vents sont plus localisés, par exemple sur la mer (différence de température entre la mer et la terre) ou sur les montagnes (différence de température entre les montagnes et les vallées).

I.2.1. Types de vent

- Il existe plusieurs types de vent. Parmi eux, nous citons trois genres.
- Vents géostrophiques : Les vents causés par les différences de température dues au réchauffement inégal de l'air dans l'atmosphère sont appelés vents géostrophiques ou

globaux. Ces vents affectent les hautes altitudes et sont composés de deux forces : la force de Coriolis et la force de poussée.

- Vent local : les changements de vitesse et de direction du vent à proximité de 100 m d'altitude sont très importants pour les applications de conversion de l'énergie éolienne. Les vents localisés sont causés par des conditions locales spécifiques. La différence de température entre la surface de la terre et la surface de la mer. Des vents localisés peuvent se produire en raison de la pression et des forces de frottement.
- Vents de surface : A la surface les vents ne sont pas aussi forts qu'à haute altitude. Tous sont le résultat d'irrégularités du terrain et des effets d'obstacles naturels ou artificiels. [19].

I.2.1.1 Caractéristiques du vent

Le vent a une nature problématique, cela présente de grandes variabilités qu'on peut classer en deux grands groupes: la variabilité temporelle et la variabilité spatiale [19].

I.2.1.1.1. Variabilité temporelle

La variation temporelle contient trois sous-groupes de basses fréquences.

- Variations annuelles, saisonnières et mensuelles.
- Fréquence modérée : variations journalières et horaires.
- Pour les hautes fréquences : supérieures ou égales aux variations par seconde.

I.2.1.2.2. Variabilité spatiale

La variation spatiale concerne principalement les variations horizontales et verticales de la vitesse du vent. Il se compose de deux catégories. D'une part, les variations spatiales régionales (géographiques et physiques) qui sont fonction de la latitude, de son insolation et de son relief. D'autre part, la variation spatiale locale compte tenu de la topographie.

I.2.2. Types de vent Distribution verticale de la température et la pression

Dans la zone troposphère, les distributions de température et pression sont respectivement exprimées par les relations suivantes :

$$T = T_a - \beta z \quad (1.1)$$

$$P = P_a \left(1 - \frac{\beta z}{T_a}\right)^{g/R\beta} \quad (1.2)$$

où T_a et p_a sont respectivement la température et la pression de surface de la mer, $z = 0$, $\beta = 0,00650$ K/m, g est la gravité et $R (= 286,9\text{J/kg.K})$ correspond à la constante de masse de l'air. (Envisageable). gaz parfait). La zone inférieure à 1 km de hauteur s'appelle la couche limite atmosphérique. C'est la zone d'interaction entre l'atmosphère et la surface et se caractérise par :

- Fortes contraintes visqueuses turbulentes;
- Variations verticales de vitesse, température, turbulence, humidité;
- Variations temporelles produites par le soleil, les nuages;
- Hauteur variable selon la période de la journée, le type de recouvrement au sol... Elle

peut être définie comme la partie de l'atmosphère où les effets directs de la surface se font sentir par la transmission de la turbulence. C'est là que s'effectuent les échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau et de quantité de mouvement. Son épaisseur (notée δ) varie du mètre au kilomètre en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité de la surface et de l'ensoleillement local. [20,21].

I.2.3. Théorie de Betz [22]

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz

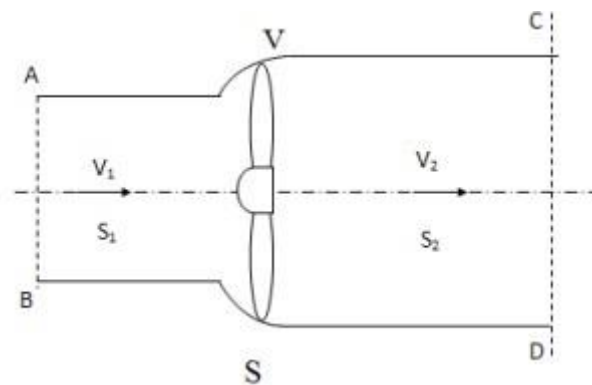


Figure I.11. Traversée d'un capteur de surface S par un fluide

Betz suppose que l'éolienne est dans l'air biologique à l'infini en avant de la vitesse V_1 et à l'infini en aval de la vitesse V_2 . La production d'énergie ne se fait qu'au détriment de "l'énergie cinétique de l'air, vitesse V_2 ". La vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . En conséquence, une veine de liquide s'étend à travers l'éolienne (voir schéma).

- V_1 : vitesse du vent à l'entrée de l'éolienne (en amont du disque)
- V_2 : vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par l'éolienne (en aval du disque)
- V : La vitesse du vent à la traversée de l'éolienne. (Au niveau de l'éolienne)
- 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 :

- Loi de conservation de la masse.
- Loi de variation de la quantité de mouvement.
- Loi de variation d'énergie cinétique. L'incompressibilité de l'air et la permanence d'écoulement (Loi de conservation de la masse) donne :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (1.3)$$

I.3. CHARGEMENTS SUR UNE STRUCTURE EOLIENNE

I.3.1. Sources des chargements sur une pale d'éolienne

On peut distinguer trois principales sources de chargement sur une pale d'éolienne :

les chargements aérodynamiques, gravitationnels et inertiels

Les chargements aérodynamiques Causé par l'interaction des structures et du vent. La poussée (dans la direction parallèle à l'axe du rotor) est la charge la plus importante lors du fonctionnement d'une éolienne. Il s'agit d'une charge répartie avec une force variable le long de la lame. Cela provoque la flexion de la lame hors du plan de rotation. Une charge de serrage inférieure agit également sur la face du rotor. Ce dernier génère le couple nécessaire à la production d'énergie. Si la direction du vent est parallèle à l'axe du rotor et que la vitesse est constante sur la surface du rotor, la charge aérodynamique ne change pas dans le temps. Cependant, des charges cycliques peuvent survenir en raison de divers facteurs. Ces facteurs comprennent la turbulence du vent, le cisaillement du vent (variation de la vitesse du vent avec l'altitude due au profil de la couche limite atmosphérique), le désalignement de la nacelle (direction du vent non parallèle à l'axe du rotor), l'inclinaison du plan du rotor Il est inclus. correspond à l'axe horizontal.

Les chargements gravitationnels S'applique dans le plan du rotor et se produit périodiquement à une fréquence égale à la fréquence de rotation du rotor. Par conséquent, l'analyse de la fatigue des pales doit en tenir compte. L'importance de ces contraintes dans la construction des pales augmente avec la taille des pales. Les charges d'inertie peuvent être causées soit par la géométrie de la turbine, soit par des commandes effectuées par la machine. Dans le premier cas, on peut citer le chargement axial de la pale provoqué par la force centrifuge et la flexion hors plan (plan de rotation) provoquée par la combinaison de la force centrifuge et de la conicité du rotor (angle entre pale et rotor). rotation, dont le but est d'éloigner la pale du mât). Les contraintes causées par les actions de commande comprennent la flexion dans le plan de rotation due au freinage et à l'accélération du rotor, et les contraintes du gyroscope dues au réalignement de l'axe de rotation du rotor. La modification de l'angle d'inclinaison peut également créer des charges d'inertie sur les machines à pas variable [23,24].

I.3.2. Influence de la taille de l'éolienne sur les chargements

La relation analytique entre la taille, les dimensions et la puissance de l'éolienne peut être utilisée pour déterminer l'impact de l'augmentation de la taille du rotor sur diverses variables qui jouent un rôle dans la conception de l'éolienne. On suppose que la vitesse spécifique est constante, le nombre de pales, de pales et de matériaux utilisés sont les mêmes et les proportions géométriques sont conservées. Dans ce cas, par exemple, la masse des pales du rotor est proportionnelle au cube du rayon du rotor. Pour les problèmes de conception, il est intéressant de voir comment les charges sur les pales du rotor changent à mesure que la taille du rotor augmente. Selon Manwell et al. (2002) la contrainte maximale de pied de pale causée par les charges aérodynamiques et centrifuges ne varie pas avec le rayon du rotor, alors que la même contrainte due à la charge de gravité varie linéairement avec le rayon du rotor. Selon ces relations, l'augmentation de la taille de l'éolienne devrait augmenter la charge gravitationnelle par rapport à la charge totale. [23].

Pour approfondir l'analyse, Asuri et Zaaijer (2008) ont utilisé la manière des constituent finis pour estimer les contraintes dans les pales de rotor de différentes tailles. Pour ce faire, ils ont utilisé une pale de référence d'une éolienne de 5 MW et l'ont mise à l'échelle proportionnellement pour produire des pales de rotor pour des machines de 10, 15 et 20 MW. Les mêmes conditions de vent ont été utilisées pour toutes les éoliennes. Cette étude montre que la contrainte augmente avec la longueur de la pale (bien que l'endroit sur la pale où la contrainte est mesurée ne soit pas précisé). Pour une éolienne de 5 MW, la charge due à la charge aérodynamique dans la direction des volets est dominante, mais la charge due à d'autres charges également. À mesure que la taille de la pale augmente, l'ampleur de la contrainte due à la gravité et aux charges d'inertie augmente également (charge de la corde due au poids de la pale et charge axiale due à la force centrifuge). Par conséquent, les pales de rotor installées dans des machines d'une puissance de sortie supérieure à 8 MW sont plus chargées par la gravité et les charges inertielles que par les charges aérodynamiques. Bien entendu, cette limite d'environ 8 MW ne représente pas une limite absolue, car elle dépend de l'éolienne considérée. Cependant, on peut conclure que les pales de 8 MW étudiées dans ce projet sont situées dans une zone de transition entre des pales dominées par des charges aérodynamiques et des pales dominées par des charges gravitationnelles et inertielles. [24].

CHAPITRE II.
MODELISATION

CHAPITRE II.

MODELISATION

Dans ce chapitre, nous avons introduit la modélisation géométrique 3D de la structure granulaire. Nous avons d'abord présenté la conception assistée par ordinateur, puis un aperçu du prototype d'éolienne. Enfin, nous avons construit et exécuté la conception et l'esquisse de tous les composants et l'assemblage de la structure de la lame à l'aide de SOLIDWORKS.

II.1. THEORIES

II.1.1. Théorie de l'analyse modale

Au cours des deux dernières décennies, l'analyse modale est devenue une technique importante pour déterminer, améliorer et optimiser les propriétés dynamiques des structures. L'analyse modale, appelée analyse fréquentielle en simulation, est le processus de détermination des modes de vibration caractéristiques et des caractéristiques dynamiques d'un système sous la forme de fréquences propres pouvant entraîner une dégradation du système en cas de résonance dynamique. [25].

Les mouvements des masses structurelles provoquent des vibrations après un mouvement harmonique simple. La forme déformée est caractérisée par la marche. Ce sont des formes caractéristiques de vibration

L'équation du mouvement pour plusieurs DDL est donnée sous la forme suivante :

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F(t) \quad (2.1)$$

Dans notre étude, nous supposons que le corps vibre en l'absence d'excitation et d'amortissement (vibration libre non amortie). La vibration est classée comme non amortissable, la dissipation d'énergie sous forme de chaleur (frottement) lors des mesures provoque une diminution de l'amplitude des vibrations qui est inférieure à la sensibilité des instruments de mesure. Les équations régissant la modélisation modale du système structurel sont formées :

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (2.2)$$

Où $[M]$, $[C]$ et $[K]$ sont respectivement. Matrices de masse, d'amortissement et de rigidité, et $\{t\}$ vecteur de force externe aérodynamique indépendante de la réponse structurale. Il n'affecte pas la stabilité de la pale et il est donc négligé. $\{U\}$, $\{\dot{U}\}$ et $\{\ddot{U}\}$ sont le vecteur de déplacement, vitesse et accélération (composants de chaque nœud). Les modes propres de vibrations sont ceux pour lesquels tous les points vibrent en phase. On cherche donc la solution sous la forme :

$$U(t) = X \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (2.3)$$

On remplace par la solution on obtien :

$$-MX\omega_0^2 + KX = 0 \quad (2.4)$$

C'est l'équation aux valeurs propres. Les X_i ainsi définis sont les modes propres de la structure, ils représentent les déplacements aux nœuds du maillage en éléments finis lors d'une vibration propre de la pale.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.5)$$

Cette dernière équation montre que la pulsation naturelle est indépendante des conditions initiales ou des vibrations externes. Elle est inhérente à la structure. On peut en déduire les fréquences propres de chaque mode de vibration:

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2.6)$$

Avec : $n= 1, 2,3 \dots j$

Ou T_n est la période propre de chaque mode de vibration exprimée en seconde [26].

II.1.2. Simulation modale de la pale

II.1.2.1. Choix des matériaux de construction

La lame est fabriquée en alliage d'aluminium 1060. L'aluminium présente de nombreux avantages par rapport à d'autres matériaux (résistance et rigidité accrues, excellente résistance à la corrosion, légèreté, 100% recyclable) et les bibliothèques disponibles dans SOLIDWORK S/ Simulation permettent d'étudier l'utilisation de matériaux réalistes.

L'alliage d'Aluminium 1060 est caractérisé par :

- Module d'élasticité [GPa] : 69
- Coefficient de Poisson : 0.33
- Limite d'élasticité [MPa] : 27.57
- Masse volumique [kg/m³] : 2700

II.1.2.2. Conditions aux limites

Des conditions limites sont nécessaires pour définir l'environnement opérationnel du modèle. Les résultats de l'analyse dépendent directement du montage spécifié. Si les déplacements du montage s'appliquent aux deux boulons en U, tous les déplacements sont annulés.

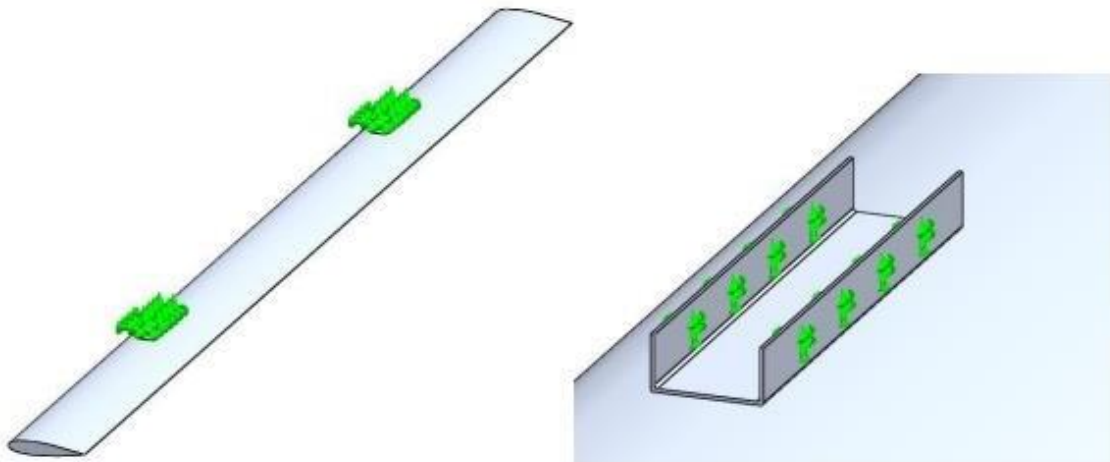


Figure II.1. Les conditions aux limites pour l'analyse de la pale.

II.1.2.3. Maillage volumique de la pale:

Des simulations numériques ont été réalisées à l'aide de 991 262 éléments tétraédriques 3D carrés dont la taille variait de 1,58 mm à 7,90 mm. Le réseau se composait de 1966080 nœuds avec 5895378 DOF. Le maillage de certaines pièces complexes est soumis à un contrôle de maillage. Les modes vibrationnels ont été calculés à l'aide de la méthode de Lanczos (solveur FFEPlus). Le réseau est représenté sur la Figure II.2.

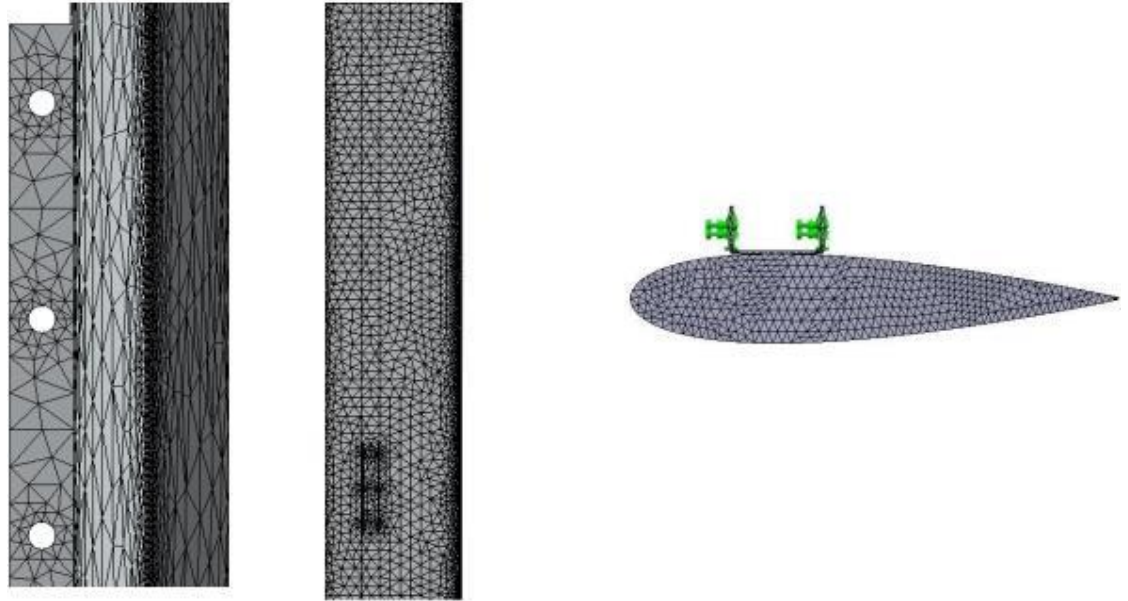


Figure II.2. Maillage 3D de la pale en Aluminium par éléments finis 3D

II.1.2.4. Construction des pièces de fixation de la pale :

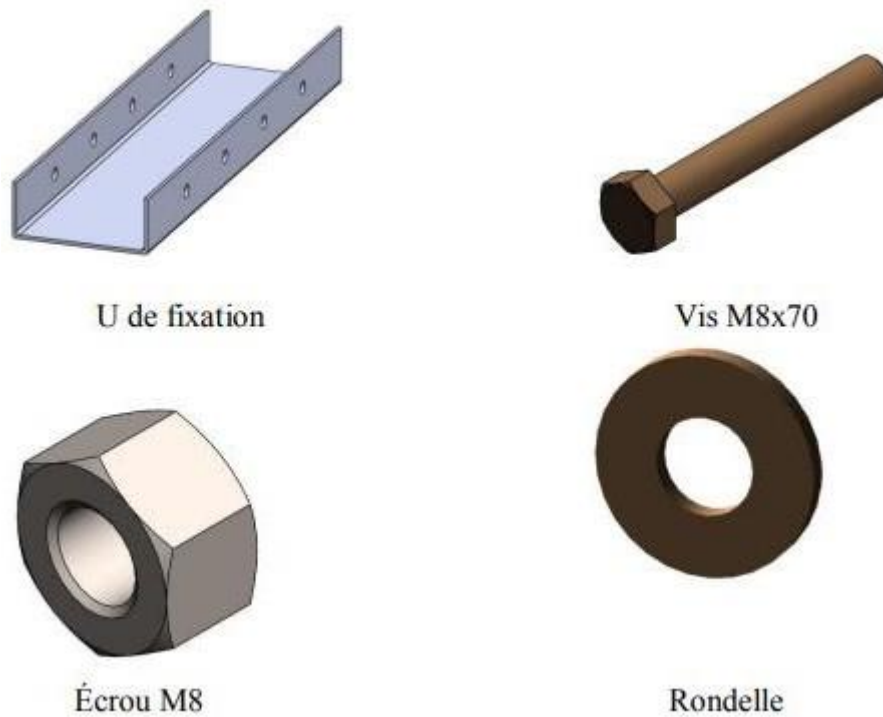


Figure II.3. Les différentes pièces de fixation.

II.1.2.5. Assemblage la pale

Un assemblage SOLIDWORKS est un ensemble de pièces avec l'extension sldasm. Contient au moins deux pièces mutuellement définies par des contraintes d'assemblage. Simultané, coaxial, à distance, etc. [27].

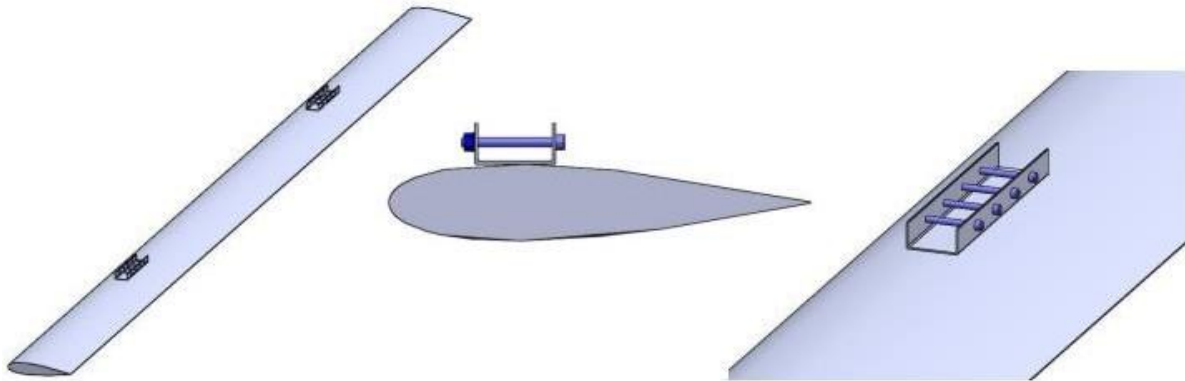


Figure II.4. Structure de la pale complète

CHAPITRE III.
ANALYSES ET RESULTATS

CHAPITRE III.

ANALYSES ET RESULTATS

Le chapitre précédent a été consacré à la présentation des différents modes de modélisation utilisés.

A travers ce chapitre, nous allons présenter et analyser les résultats obtenus au cours de l'étude menée sur : les éoliennes

En premier lieu, on présentera les résultats de profil de vitesse du vent . En second lieu, on mettra en évidence les résultats issus des différentes caractérisations des modes propres et les fréquences propres

III.1. MODELISATION DE LA VITESSE DU VENT

Notre objectif est de montrer comment la vitesse du vent a été modélisée, en sorte qu'elles puissent être reproduites ultérieurement.

III.1. 1. Profil de vitesse du vent

La Figure III.1 montre les profils de vitesse du vent obtenus par l'Équation :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_{*0}}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + 5,75 \left(\frac{z}{h} \right) - 1,88 \left(\frac{z}{h} \right)^2 - 1,33 \left(\frac{z}{h} \right)^3 + 0,25 \left(\frac{z}{h} \right)^4 \right] \quad (3.1)$$

en considérant $u(z = 10 \text{ m}) = 3, 6, 9$ et 12 m/s . La hauteur de la couche limite atmosphérique h a été évaluée par l'Équation (3.2),

$$h = \left(\frac{1}{30 L_{MO}} + \frac{f_c}{0,35 u_{*0}} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

Proposé par Deardorff (1972). Pour chaque courbe, deux systèmes d'équations sont résolus numériquement pour h et u_{*0} . Pour vérifier l'influence de la longueur Monin-Obkhov, la figure montre les courbes correspondantes à $L_{MO} = 50$ mètres (atmosphère très stable) et $L_{MO} = 450$ mètres (atmosphère stable quasi neutre selon le tableau III.1). . Comme prévu, la hauteur de la couche limite est faible dans des conditions très stables. Pour la même vitesse du vent à l'altitude $z = 10 \text{ m}$, le modèle prédit que la vitesse du vent à la hauteur du rotor augmente à mesure que le L_{MO} diminue. La courbe de la figure 3.1 correspond à une rugosité de terrain $z_0 = 0,03 \text{ m}$ (terrain agricole ouvert selon le tableau III.1).

La constante de von Karman considérée est $\kappa = 0,372$. Pour évaluer le paramètre de Coriolis f_c , la latitude de la ville de Rouen est prise en compte. 49,44 degrés. La figure III.2 montre exactement la même courbe que dans la figure précédente, mais cette fois $z \leq 200$ m au lieu de $z \leq h$. De cela, nous pouvons conclure que la condition de stabilité atmosphérique n'affecte pas significativement le profil de vitesse du vent pour $z \leq 50$ m.

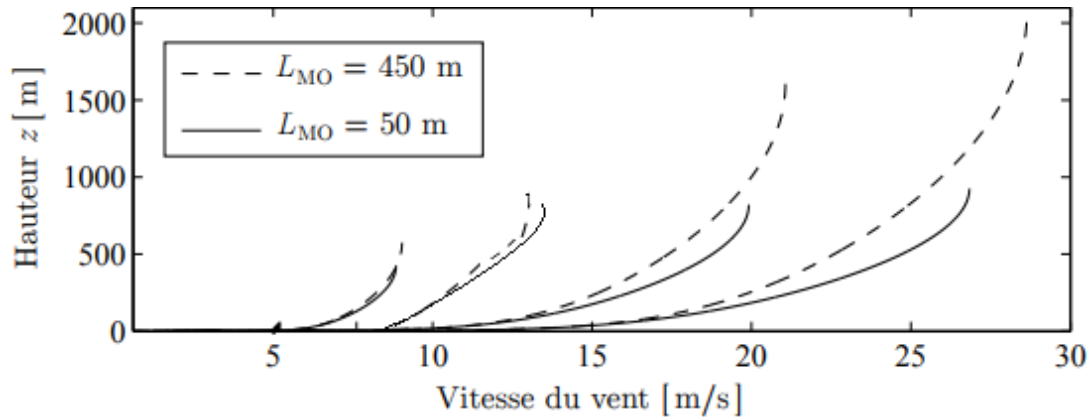


Figure III.1. Courbes de vitesse du vent en fonction de la hauteur et de la longueur de Monin-Obukhov, pour $u(z = 10 \text{ m}) = 3, 6, 9$ et 12 m/s et $0 \leq z \leq h$.

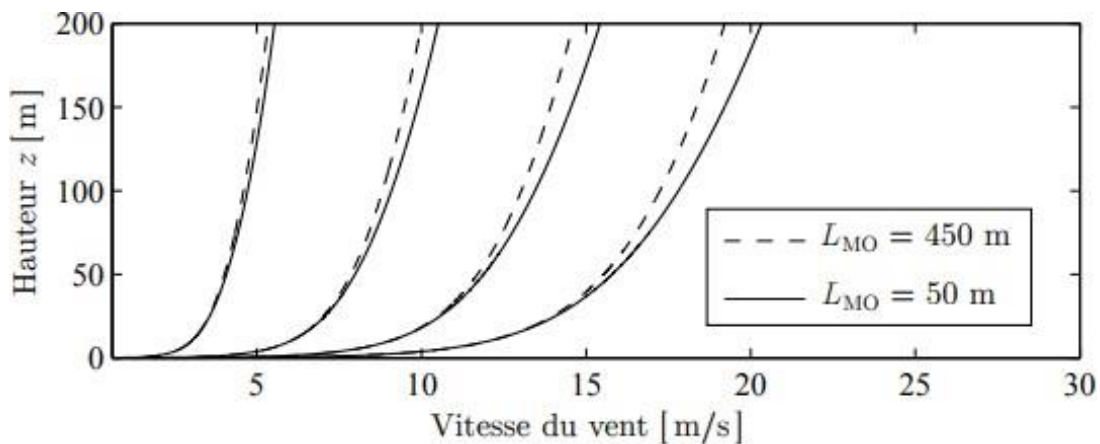


Figure III.2. Courbes de vitesse du vent en fonction de la hauteur et de la longueur de Monin-Obukhov, pour $u(z = 10 \text{ m}) = 3, 6, 9$ et 12 m/s et $0 \leq z \leq 200$ m.

En considérant le profil donné par l'équation (3.1) et la longueur constante de Monin Obhoff de l'équation (3.2), la relation entre $u(z = 10 \text{ m})$ et $u(z = 44 \text{ m})$ est pratiquement linéaire. Pour $LMO = 250$ mètres, on peut écrire :

$$u_{44} = 1,26 u_{10} + 0,1338 \quad (3.3)$$

où u_{10} et u_{44} sont les vitesses du vent aux hauteurs $z = 10$ et 44 mètres. Les deux vitesses sont en mètres par seconde.

Tableau III.1. Les types de paysage et leurs longueurs de rugosité (Kishore, 2010 ; Wiki Éolienne, 2016) [26,27].

Type de paysage	z_0 [m]
Surface d'eau	0,0002
Terrain complètement dégagé avec une surface lisse, p. ex. une piste d'atterrissage en béton ou de l'herbe fraîchement coupée	0,0024
Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives, et avec très peu de constructions. Seulement des collines doucement arrondies.	0,03
Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1250 m les unes des autres.	0,055
Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres.	0,1
Terrain agricole avec beaucoup de constructions, arbrisseaux et plantes, ou des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres.	0,2
Villages, petites villes, terrain agricole avec de nombreuses ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté.	0,4
Grandes villes avec de haut immeubles.	0,8
Très grandes villes avec de hauts immeubles et de grattes ciel	1,6

III.2. MODES PROPRES ET LES FREQUENCES PROPRES

La modélisation modale (libre) des pales de rotor est vérifiée en gardant le système considéré non chargé (l'analyse modale ne nécessite pas l'application de charges). L'analyse modale suppose que le corps vibre sans excitation ni amortissement. [28].

III.2.1. Modes propres et les fréquences propres

Les résultats obtenus (de simulation) pour les 5 premiers modes de vibration étudiés des pales sont présentés dans les Figures (III.3) à (III.7) ci-dessous, et les valeurs pour les 20 premiers modes de vibration des pales sont présentées dans le Tableau (III.2). Les figures (III.3) à (3.7) révèle que la forme des cinq premières formes modales des pales du rotor se rapproche de la forme en flexion libre de la poutre à double appui. Les premier et deuxième modes propres des pales du rotor sont des modes de flexion dans lesquels les caractéristiques physiques des matériaux utilisés (densité, raideur, etc.) n'ont pratiquement aucun effet sur la pulsation propre.

Masse en rotation de l'éolienne (rotor). Sa vitesse varie entre 0 tr/min (démarrage) et $N=20$ tr/min (20 m/s pour des conditions extrêmes de fonctionnement). Ensuite, la gamme de fréquences pour cette invite de fréquence :

$$f = \frac{N=0 \text{ à } 20}{60} = 0 \text{ à } 2 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

Le tableau (III.2) montre que les vitesses de vent élevées ne provoquent pas de résonance de la structure des pales du rotor car la fréquence fondamentale de l'éolienne est éloignée de la fréquence d'excitation externe du vent de fonctionnement rapide.

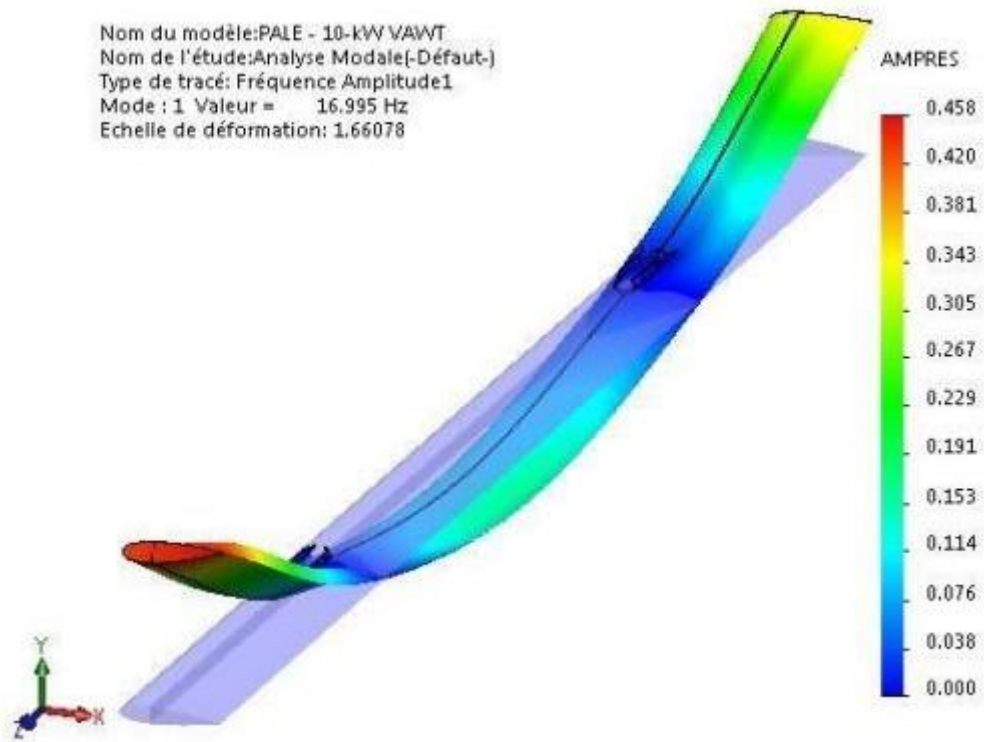


Figure III.3. 1^{er} mode de vibration (Flexion autour de l'axe X).

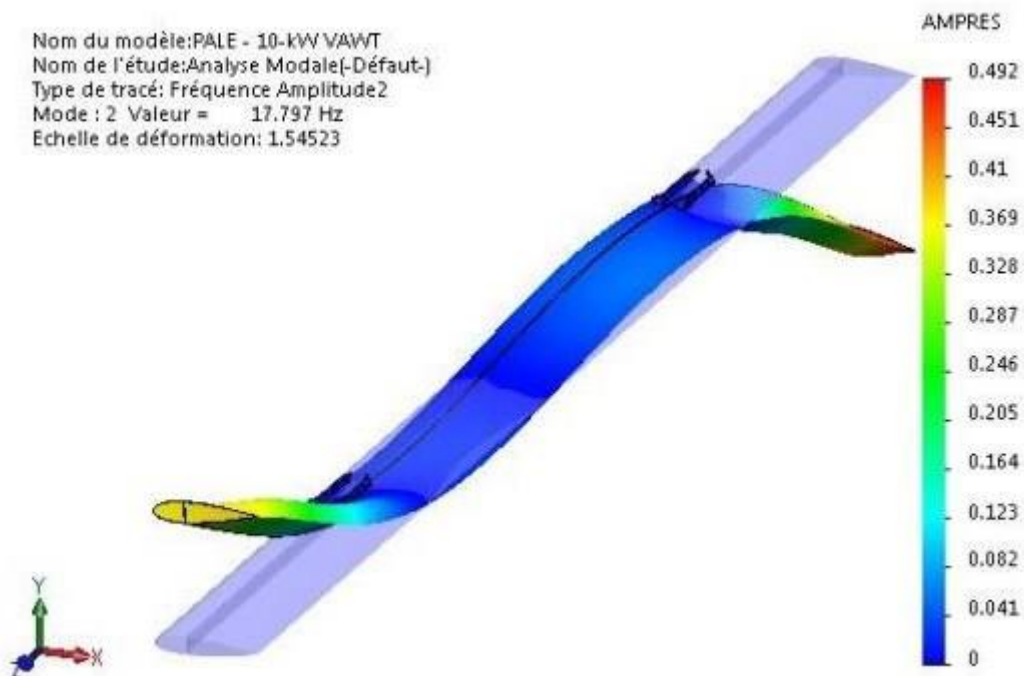


Figure III.4. 2^{ème} mode de vibration (Flexion autour de l'axe X).

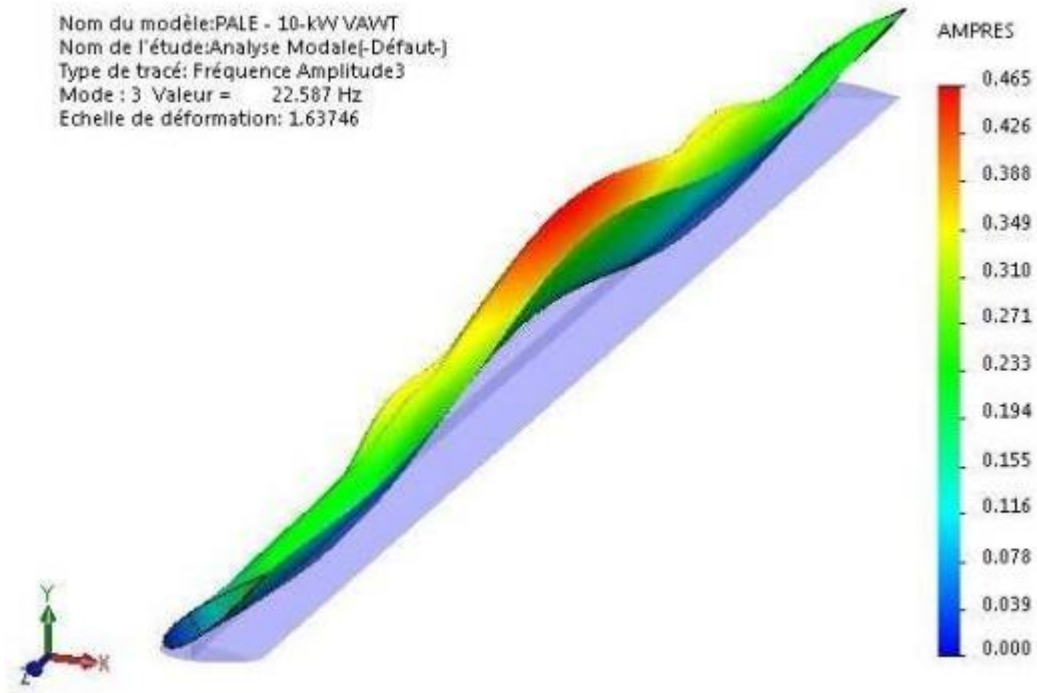


Figure III.5. 3^{eme} mode de vibration (Flexion autour de l'axe X).

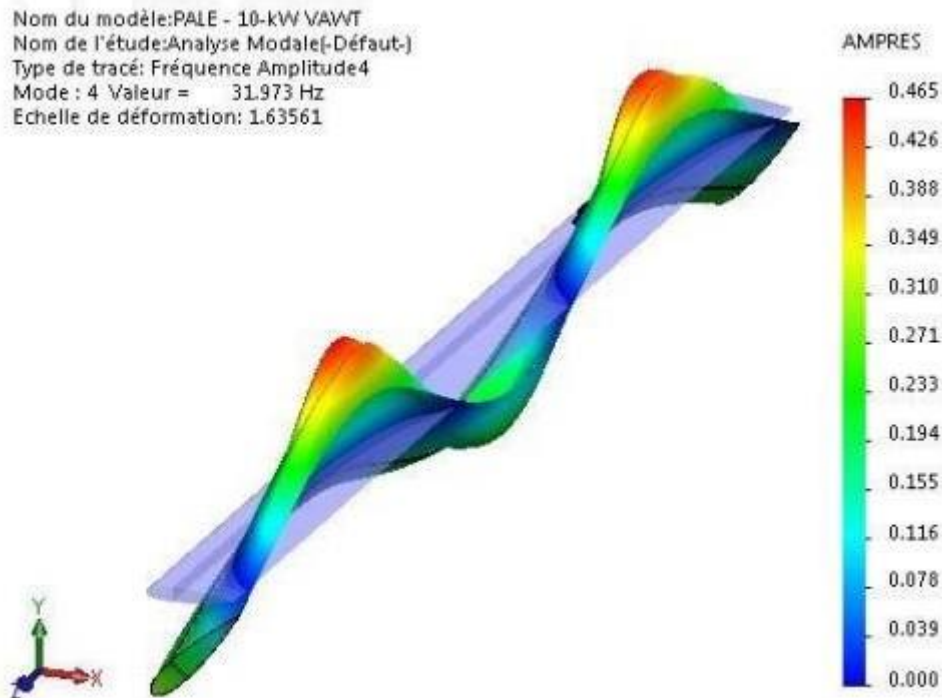


Figure III.6. 4^{eme} mode de vibration (Flexion autour de l'axe X).

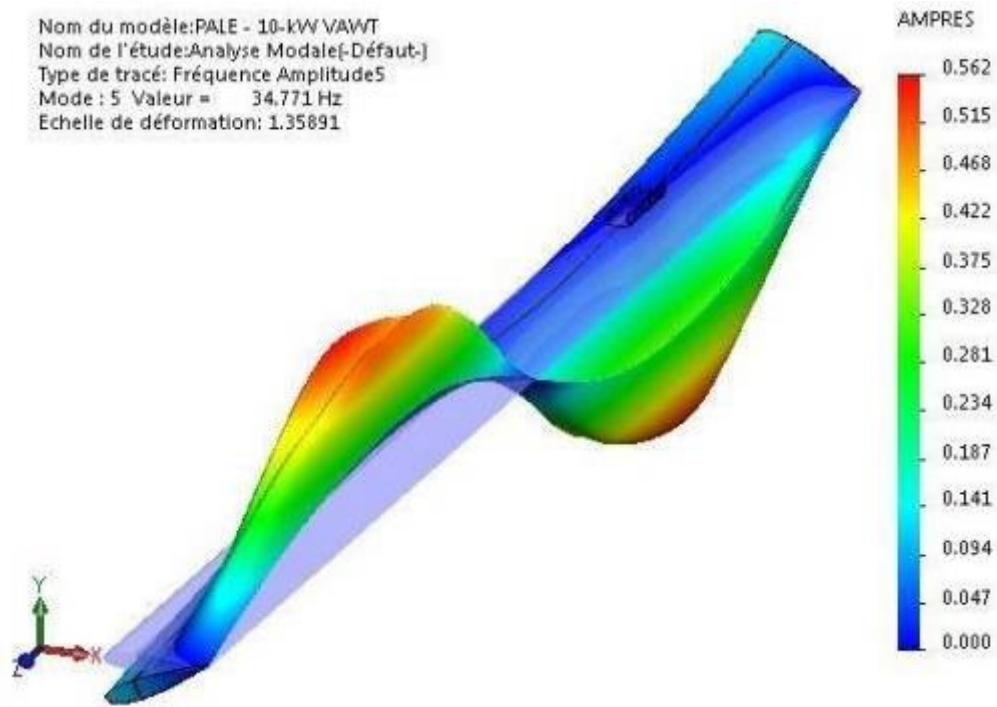


Figure III.7. 5^{eme} mode de vibration (Flexion autour de l'axe X).

Tableau III.2. Fréquences propres de la pale

N° de mode	Fréquence (Rad/sec)	Fréquence (Hz)	Période (sec)
1	106.78	16.995	0.058842
2	111.82	17.797	0.056189
3	141.92	22.587	0.044273
4	200.89	31.973	0.031276
5	218.47	34.771	0.02876
6	267.26	42.536	0.023509
7	277.19	44.116	0.022668
8	290.02	46.158	0.021665
9	312.83	49.788	0.020085
10	320.50	51.010	0.019604
11	348.97	55.541	0.018005
12	353.43	56.251	0.017778
13	367.39	58.472	0.017102
14	373.67	59.471	0.016815
15	376.80	59.970	0.016675
16	378.25	60.200	0.016611
17	385.82	61.405	0.016285
18	388.88	61.892	0.016157
19	410.46	65.327	0.015308
20	413.22	65.765	0.015206

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Un objectif préalablement défini de cette étude était la modélisation et le contrôle d'un générateur éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation pour étudier les performances de ce système énergétique.

Le premier chapitre donne un aperçu du système éolien. Différents types d'éoliennes existantes avec des constructions différentes ont été décrites : éoliennes à axe vertical et éoliennes à axe horizontal. Nous avons également considéré la loi fondamentale qui permet la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Nous avons également parlé des avantages et des inconvénients de la production d'énergie éolienne. Dans le deuxième chapitre. Nous avons présenté la modélisation mathématique des différents éléments de la chaîne de conversion.

Nous avons profilé la principale source d'énergie, le vent, et modélisé la turbine pour avoir un point de fonctionnement où la puissance produite est toujours maximale. La turbine est reliée au générateur par l'intermédiaire d'un réducteur.

Dans le chapitre 3, nous avons simulé l'application du contrôle prédictif de la puissance active et réactive dans les réseaux électriques en tenant compte du suivi du point de puissance maximale. Les résultats obtenus montrent que la puissance produite suit la forme du profil du vent, la puissance produite par la turbine est la puissance optimale, et le déphasage entre tension et courant du système peut être contrôlé via les critères de puissance réactif.

Perspective

Dans le cadre de cette étude, il est proposé de modifier la chaîne de conversion en introduisant un convertisseur commandable au lieu d'un convertisseur à diodes en sortie du générateur afin d'améliorer le contrôle et les performances du système.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] REpower ([http:// www. repower. fr/](http://www.repower.fr/))
- [2] BOUDIA Sidi Mohammed «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. 2013.
- [3] Haritza CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse» Thèse de Doctorat. Bordeaux. Soutenue le 18 décembre 2003.
- [4] B. Lester and R. Brown, "Le développement de l'éolien dans le monde," France Energies éolienne, Global Wind Energy Council (GWEC),2011.
- [5] Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [6] M.Z.Labidine , Université de Mentouri, mémoire, « ETUDE DYNAMIQUE ET OPTIMISATION DES PALES D'UN AEROGENERATEUR »
- [7] L'éolien à axe vertical - Introduction, 05/02/2020, <https://web.eolieenergie.fr/presentation/eolienne-a-axe-vertical/>
- [8] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004
- [9] N. YAHIAOUI, Université A.MIRA-BEJAIA, mémoire, « etud et caracterisation des eoliennes » ,2018,
- [10] K.ZIANE. Analyse, Évaluation et Réduction des Risques d'un Parc Éolien. Univoran
- [11] WWEA ; world wind energy association ; April 2020
- [12] S.BENTOUBA « Les énergies renouvelables dans le cadre d'un développement durable en Algérie » SIPE8, 11 et 12 Nov 06 Bechar.
- [13] La Tribune (Alger) 17 décembre 06.
- [14] Atelier de réflexion sur la stratégie de développement et à l'avenir des énergies 59 renouvelables en Algérie, décembre 2006

[15] centre de développement des énergies renouvelables

[16] Y. BENTALEB et Y. HACENE, « Etude d'un émulateur éolien », 2008

[17] Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne, 05/02/2020, <http://energiedemain.emonsite.com/pages/comparaison-de-ces-solutions-avec-le-nucleaire-et-propositions-desolutions/avantages-et-inconvenients/avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne.html>

[18] Léa THEBAUD, 'Analyse de données de vent en Europe pour caractériser le potentiel éolien en mer', 31 mai 2018.

[19] J. Chapellaz, J. M. Barnola, D. Raynaud, Y. S. Korotkevitch, C. Lorius, "Ice record of atmospheric methane over the past 160 000 years," *Nature*, n°345, pp. 127-31, 1990.

[20] J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. Vand der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson, "Climate change 2001 : The scientific basis - Contribution on the working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change," Cambridge University Press, Royaume-Uni, 2001, ISBN 0-5210-14956, pp. 892.)

[21] M. Debbache. De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites. Mémoire Magistère. Algérie 2012.

[22] MANWELL, J., MCGOWAN, J., et ROGERS, A. (2002). *Wind Energy Explained : Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons, Chichester (Angleterre).

[23] HANSEN, M. O. (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines*. James & James, Londre (RoyaumeUnis), 2e édition.

[24] ASHURI, T. et ZAAIJER (2008). Size Effect On Wind Turbine Blade's Design Drivers. 2008 European Wind Energy Conference & Exhibition, Bruxelles (Belgique), 31 mars – 3 avril.

[25] Zhi-Fang Fu, Jimin He. *Modal Analysis*. Elsevier, 2001.

[26] FERROUDJI, F. «conception et optimisation en dynamique forcée d'un nouveau prototype de système de suiveur solaire à deux axes.» these doctorat sciences, université de batna, batna, 2015.

[27] FERROUDJI, F. «conception et optimisation en dynamique forcée d'un nouveau prototype de système de suiveur solaire à deux axes.» these doctorat sciences, université de batna, batna, 2015

[26] Kishore, V. V. N., Ed. (2010). Renewable energy engineering and technology : principles and practice. The Energy and Resources Institute.

[27] Wiki Éolienne (2016). <http://eolienne.f4jr.org/rugosite> (site internet consulté le 12 juin 2016).

[28] Priestley, M. J. N., Seible, S., and Calvi, G. M. "Seismic Design and Retrofit of Bridges". New York: Wiley, 1996.

La puissance disponible d'un système éolien dépend principalement de la vitesse du vent. De plus, le système éolien donnera une sortie en puissance qui varie en fonction de la vitesse de sa génératrice qui est une MSAP (machine synchrone à aimants permanents) dans notre cas, Notre étude a pour objectif d'analyser l'influence d'un défaut et la déconnexion d'une de système de puissance, cette analyse à révéler des anomalies relative aux : Profil de la tension au niveau de tous les jeux de barres, les profils des vitesses des générateurs en présence des sources renouvelables ainsi que la stabilité transitoire du réseau.

Mots clés : système éolien ; vitesse du vent ; simulation.

ملخص

تتمثل قدرة النظام العولي في توليد الطاقة الكهربائية اعتماداً على سرعة الرياح. بالإضافة إلى ذلك، فإن النظام العولي سيعطي خرجاً في القدرة يتغير وفقاً لسرعة مولد الطاقة المتجددة (MSAP) في حالتنا، هدفنا من هذه الدراسة هو تحليل تأثير عطل وانقطاع أحد أنظمة القدرة، وذلك من أجل الكشف عن الشذوذات المتعلقة بـ: ملف التردد على مستوى جميع مجموعات الحبال، ملفات السرعات للمولدات في وجود مصادر الطاقة المتجددة، وكذلك الاستقرار التوافقي للشبكة.