

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Mécanique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister en : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

**Conception par la CAO des parties fixes d'une
éolienne et les solutions technologiques de
liaisons de l'installation.**

Présenté par :

Hamza Soumia

Soutenu publiquement le/...../.....

Devant le jury composé de :

Pr. HECINI	Mabrouk	Président	Université de Biskra
Dr. HADID	Mohamed	Rapporteur	Université de Biskra
Pr. MOUMMI	Noureddine	Examineur	Université de Biskra
Dr. TATI	Abdelouahab	Examineur	Université de Biskra

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout Puissant qui nous a éclairé le bon chemin

Nous remercions notre encadreur Dr HADID Mohamed de m'avoir encadré pour la préparation de mon projet de fin d'étude et de m'avoir dirigé pour mener à bien ce travail et pour me donner le gout d'une initiation dans la recherche.

Nous remercions également les membres de jury Monsieur **HECINI Mabrouk** et Monsieur **MOUMMI Nouredine** et Monsieur **TATI Abdelouahab** d'avoir accepter d'examiner ce manuscrit.

Sans oublier de remercier l'ensemble des enseignants de département de génie mécanique de l'université Mohamed Khider de Biskra pour avoir contribuer dans notre formation.

Dédicace

A mes parons.

A ma famille.

A mes enseignants.

A tous les membres de département du génie mécanique d'université de Biskra.

A tous les membres de laboratoires de génie mécanique d'université de Biskra.

Table des matières

Remerciements et dedicace:.....	I
Table de matiere.....	II
Index des figures.....	VI
Index des tableaux.....	VIII
Index des symboles.....	1
Introduction générale.....	3

Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

I.1. L'énergie éolienne.....	6
I.2. Historique	6
I.3. L'éolien dans le monde.....	8
I.3.1. En Usa et en Chine.....	9
I.3.2. En Europe.....	11
I.3.3. En Asie et en Afrique.....	12
I.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	12
I.4.1. Les avantage	12
I.4.2.les inconvénients.....	14
I .5. Ressources éoliennes	15
I.5.1.Origine des vents.....	15
I.5.2.La force de coriolis	16
I.5.3. Les directions dominantes du vent.....	17

Table des matières

I.6. Critères de choix d'un site éolien	17
I.6.1. Conditions climatiques.....	18
I.6.1.1. Vent	18
I.6.1.2. Turbulence.....	20
I.6.2.conditions sur les sites d'implantation	21
I.7. Potentiel du vent en algérie	21
I.8.l'avenir de l'énergie éolienne.....	24
I.9.Le stockage.....	25

Chapitre II : les systèmes éoliens

II.1. Définition du système éolien	28
II.2. Classification des Aérogénérateurs	28
II.2.1. Eoliennes à axe vertical	29
II.2.1.1. Le rotor de savonius	29
II.2.1.2 le rotor de darrius	30
II .2.2. Eoliennes à axe horizontal.....	30
II.2.2.1.eoliennes sous le vent (aval).....	31
II.2.2.2. Eoliennes face au vent (amont)	32
II.3. Caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal.....	33
II.3.1. La nacelle	33
II.3.1.1. Le rotor.....	34

Table des matières

II.3.1.2. La girouette et l'anémomètre	34
II.3.1.3. Le dispositif d'orientation	35
II.3.1.4. Le système de freinage	35
II.3.1.5. L'arbre principal.....	35
II.3.1.6. Le multiplicateur	36
II.3.1.7. L'arbre secondaire.....	37
II.3.1.8. La génératrice.....	37
II.3.2. Le mat.....	38
II.3.2.1. type du mat de l'éolienne	38
II.3.2.1.1. Autoportante ou Guy-cablé	38
II.3.2.1.2. Mat en treillis	39
II.3.2.1.3. Mat tubulaire.....	39
II.3.2.1.4. Mat hybride	40
II.3.2.2. Tendance conception de tour.....	41
II.3.2.3. Hauteur de tour l'éolienne.....	41
II.3.3. La fondation.....	42
II.4. Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....	42

Chapitre III: Recherche bibliographie

III.1: recherche bibliographie.....	45
-------------------------------------	----

Table des matières

Chapitre IV: cas d'application

IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Géométrie de la tour	52
IV.3. Modélisation des chargements	54
IV.3.1. Le poids.....	54
IV.3.2. Action du vent sur le mat	54
IV.3.3. Action du vent sur les pales	57
IV.3.4. Le couple moteur	62
IV.4. Résultants et discussion.....	62
IV.4.1. Calcul des déplacements.....	63
IV.4.2. Calcul des contraintes de Von mises.....	63
IV.4.3.Réactions au niveau de la fondation	65
Conclusion générale	68
Références	69
Annexe	71

Index Des Figures

Chapitre I

Figure I.1 : Moulins à vent (éoliennes classique).....	8
Figure I.2 :Classement d'énergie dans le monde.....	9
Figure I.3 :capacité éolienne installé dans le monde	10
Figure I.4 :Développement d'énergie éolienne dans le monde.....	11
Figure I.5 : La force de Coriolis.....	16
Figure I.6 : Effet de tunnel.	19
Figure I.7 :Effet de colline.	20
Figure I.8: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10m d'altitude du sol ...	22
Figure I.8: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 25 m d'altitude du sol ...	22

Chapitre II

Figure II.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	28
Figure II.2: éoliennes à axe vertical de type SAVONIUS.....	30
Figure II.3: éoliennes à axe vertical de type DARRIEUS.....	30
Figure II.4: Eolienne à axe horizontal.....	31
Figure II.5 : éolienne sous le vent, tripale flexible.....	32
Figure II.6 : Eolienne face au vent (amont)	32
Figure II.7 : les principales composantes de la nacelle	33
Figure II.8 :Rotor d'une turbine.....	34
Figure II.9 : La girouette et l'anémomètre.	35

Index Des Figures

Figure II.10 : L'arbre principal d'une éolienne	36
Figure II.11 : Le multiplicateur	36
Figure II.12 : Type du mat (tour) de l'éolienne	38
Figure II.13 : Les fondations de grandes éoliennes	42

Chapitre IV

Figure IV.1 : Dimensions de la tour d'éolienne et sa disposition	53
Figure IV.2 : Détails à la base de la tour de l'éolienne Vestas	54
Figure IV.3 : Coefficient de traînée en fonction de nombre de Reynolds	56
Figure IV.4 : Distribution de l'intensité du vent le long de la tour	57
Figure IV.5 : Section d'une pale en situation de rafale.	58
Figure IV.6 : Le Profile considéré de la pale	60
Figure IV.7 : Evolution des valeurs de F_n le long de pale à 45 m	61
Fig IV.8 :Déflexion maximale le long de la tour.	63
Fig IV.9. Contrainte de Von mises le long de la tour sur la ligne face au vent	64
Figure IV.10 : Contrainte de Von mises en échelle colorée à la base de la tour	65
Figure IV.11 : Contrainte de Von mises en échelle colorée à la base de la tour	65

Liste De Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Les directions du vent suivant leurs latitudes. 17

Tableau I.2 : Vitesses du vent en Algérie 23

Chapitre IV

Tableau IV.1. Valeurs de F_n le long de la pale 45 m 61

Tableau IV.2 : Valeurs des réactions au niveau de la base de la tour..... 66

Index des symboles

u : la charge du vent (N/m^2).

D : diamètre extérieur (mm).

P_d : la pression dynamique.

C_d : le coefficient de traînée.

ρ : la masse volumique de l'air (kg/m^3).

V : la vitesse moyenne du vent (m/s).

C_r : est le coefficient de rugosité.

C_t : est le coefficient de topographie.

$V_{\text{réf}}$: la vitesse de référence (m/s).

ν : est la viscosité cinématique de l'air (m^2/s).

Re : du nombre de Reynolds.

V : La vitesse du vent (m/s).

U : la vitesse linière de rotation (m/s).

W : la vitesse du vent relatif (m/s).

C : Le couple moteur (N.m).

P : la puissance de la génératrice (w).

ω : la vitesse de rotation (rad/s).

C_n : Coefficient aérodynamique.

C_z : Coefficient aérodynamique de portance.

C_x : Coefficient aérodynamique de trainé.

F_n : La force aérodynamique (N).

l : Largeur de profile (m).

r : Rayon élémentaire (m).

R : Rayon de disque crée par les pales (m).

α : Angle de calage.

Index des symboles

i : l'angle d'incidence.

β : l'angle que fait l'axe de l'éolienne avec le vent réel.

I : l'angle d'inclinaison.

λ_0 : vitesse spécifique.



Introduction
Générale

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, la demande sur la production d'énergie durable a conduit à une multitude de solutions technologiques innovantes. La pénurie prévisible des carburants conventionnels dans un avenir proche combiné aux impacts négatifs sur l'environnement causés par les techniques traditionnelles de production d'électricité, a créé une situation qui a forcé les acteurs impliqués dans le domaine de la production d'énergie à explorer de nouveaux horizons pour la production d'énergie. Ils se sont donc penchés surtout sur des sources dites propres, en l'occurrence le solaire et l'éolien qui sont devenus les sources de substitution par excellence dans ces recherches.

La conversion de ces nouvelles sources d'énergies nécessite l'utilisation de certaines installations spécifiques. Dans le cas d'éoliennes la partie fonctionnelle étant la turbine composée d'un certain nombre de pales. Cette turbine doit être placée à une certaine hauteur garantissant une vitesse de vent plus forte et plus régulière, d'où l'utilisation d'une tour. Le coût d'une tour dans l'investissement total d'une éolienne est aux alentours de 30%, ce qui représente une marge importante. Toute tentative de réduction du coût total de l'installation doit considérer une étude d'optimisation du coût de la tour. Cette minimisation de cout nécessite la compréhension des éléments technologiques et la réalisation des calculs nécessaires pour de telles recherches. En effet, plusieurs études récentes [1-7] sont consacrées à l'étude approfondie de tours d'éoliennes. Ces tours sont construites en général soit en béton armé ou en acier. Il convient de souligner que l'utilisation de l'acier pour la construction de tours d'éoliennes a augmenté très rapidement au cours de ces dernières années.

Le présent travail propose une démarche dans le calcul d'une tour en acier d'éolienne d'une puissance de 1.65 MW. La tour présente une structure spécifique de par son élancement important et de par ses sollicitations de fonctionnement. L'outil de calcul étant les éléments finis. Notre pays qui veut

s'engager dans d'importants projets concernant les énergies renouvelables doit impérativement avoir une certaine maîtrise et une certaine expertise des aspects liés à ces types de calcul ce qui n'est pas suffisamment pris en charge actuellement, d'où ce travail.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres ;

Le premier chapitre est consacré aux généralités et aux définitions concernant l'énergie éolienne et les éoliennes ainsi à l'historique qu'a connue l'éolien. Il est cité aussi l'évolution dans l'exploitation et la transformation de l'énergie éolienne dans les différents continents. Pour montrer l'importance du choix du site d'implantation d'éoliens, il est cité les directions dominantes de la circulation des vents à l'échelle du globe. En plus, il est donné l'influence des reliefs et des topologies sur la circulation du vent à l'échelle locale.

La définition du système éolien et la classification de ces systèmes est le sujet du deuxième chapitre. Aussi, il est présenté dans le même chapitre les différentes parties et organes fonctionnels d'une éolienne, avec plus de détails sur les différents types de tour utilisés pour les éoliennes à axe horizontal.

Une recherche bibliographique est donnée au troisième chapitre sur les principaux et récents travaux liés aux tours d'éoliennes, cette partie illustre l'importance de l'étude de cette partie d'éolienne que ce soit du point de vue fonctionnel ou surtout du point de vue économique.

Le mémoire s'achève par un quatrième et dernier chapitre consacré dans son ensemble aux calculs d'une tour d'une grande éolienne. La tour en question pouvant porter un aérogénérateur de 1,6 MW de puissance. Il est donné la démarche complète pour le calcul de ce type de structure spécifique. Il est commencé par la présentation des détails de la géométrie de la tour qui a une hauteur de près de 80m, ensuite, il est donné une modélisation de toutes les sollicitations causés par le fonctionnement de l'éolienne dans des situations extrêmes et selon les normes en vigueur. Le calcul donne le comportement de la structure et vérifié son intégrité.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne

I.1. L'énergie éolienne :

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 peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit 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 soit elle alimente 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. Historique :

L'utilisation de l'énergie contenue dans le vent date de la plus haute antiquité orientale. Ainsi l'emploi de la voile pour la navigation des bateaux qui remonterait à 5000 ans en Egypte et près de 4000 ans en Chine.

C'est environ au V^{ème} siècle avant J.C que les éoliennes à axe vertical apparaissent dans quelques îles grecques et à la même époque, des éoliennes à axe horizontal auraient été utilisées en Egypte. Au III^{ème} siècle avant J.C, Héron d'Alexandrie décrit une petite éolienne à axe vertical activant un compresseur d'air qui permet le fonctionnement d'un orgue, instrument de musique mu jusqu'alors par l'énergie hydraulique.

Le moulin à vent à axe vertical fonctionne en Perse en 134 ans avant J.C, des murs protègent les pâles du vent au cours de leur retour.

En Chine, au V^{II}^{ème} siècle, l'irrigation se fait à partir d'éolienne à axe vertical présentant la particularité d'avoir des pâles mobiles qui s'effacent pendant leur retour. Les éoliennes à axe horizontal ne semblent y pénétrer que beaucoup plus tard, c'est-à-dire au XIII^{ème} siècle.

C'est au XII^{ème} siècle que l'éolienne fait son apparition en Europe, on notera l'existence d'une éolienne en France en 1105 puis en 1191 en Angleterre. Les moulins à vent sont construits couramment en Hollande à partir de 1439. Léonard De Vinci dessine des éoliennes à six pales en 1500, c'est le premier qui a eu l'idée d'étudier scientifiquement sur papier l'énergie du vent. On a retrouvé récemment des dessins d'éoliennes ressemblant étrangement à certains projets actuels. Il avait pensé au moulin à vent à axe vertical, aux venturis avec turbine au centre.

Le perfectionnement des moulins à vent va se poursuivre tout au long de XVI^{ème} et XVII^{ème} siècle, on perçoit déjà à cette époque des volets de bord d'attaque et de bord de fuite, et la géométrie variable. Les constructeurs et les utilisateurs s'occuperont déjà de la sécurité, de la fiabilité et automaticité de leurs appareils.

En 1870 la roue éolienne inventée et construite par les américains va contribuer à l'essor du pompage de l'eau ; ce type d'éolienne aura été utilisé de par le monde jusqu'à ces dernières années, plus d'un million de ces éoliennes ont été utilisées.

L'aérogénérateur, association d'une éolienne et d'une génératrice est réalisé par lord Kelvin, mais elle ne verra le jour qu'en 1880.

C'est au cours de la période de 1900-1960 que des éoliennes de grandes dimensions sont construites et la puissance des installations atteint et dépasse le mégawatt, mais ces prototypes ont vite été abandonnés parfois même avant leur mise au point définitive, face au faible coût des autres formes d'énergies.

Comme nous avons souligné plus haut c'est 1973 que l'on s'est retourné vers l'énergie éolienne du fait des grands chocs pétroliers de l'époque 1973-1975.

Il y a eu donc à ce moment-là une orientation particulière pour un essor de l'énergie éolienne notamment aux USA, Allemagne, Suède, Grande Bretagne et en France [1].



Figure I.1 : Moulins à vent (éoliennes classique) [1].

I.3. L'éolien dans le monde :

Les nouvelles exigences sur le développement durable conduisent les Etats à remettre en cause des méthodes de production d'énergie et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto 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 [2].

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

- les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance,
- l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes,
- le financement des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes.

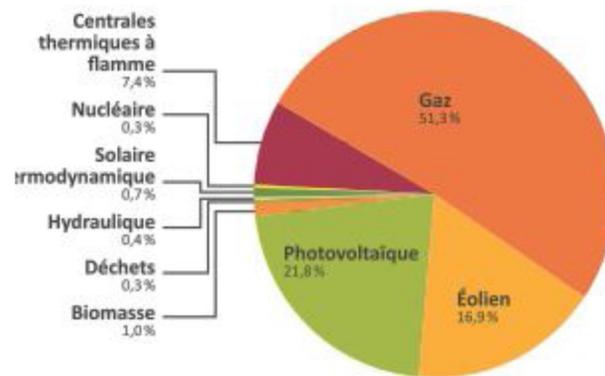


Figure I.2 :Classement d'énergie dans le monde[2].

I.3.1. En USA et en Chine :

En 2010, la chine cumule 42,3 GW d'énergie éolienne et devient le premier pays en termes de capacité installée totale, dépassant les Etats-Unis qui figuraient à la première place depuis 2007. 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 10GW 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 Sino Vel (11 % du marché) se hisse à la deuxième place, derrière le danois Vestas mais devant l'américain General Electric (10 %) qui est relégué au troisième rang, ex-aequo 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 [2].



Figure I.3 :capacité éolienne installé dans le monde[2].

I.3.2. En Europe :

L'Europe a pris une longueur d'avance en matière d'énergies renouvelables en affirmant son ambition 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 MMh, soit 5,3 % de la consommation électrique européenne.

Plusieurs pays ont annoncé des plans de développement massif : outre le Danemark(3 180 mW), l'Allemagne (23 903 mW) 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 [2].

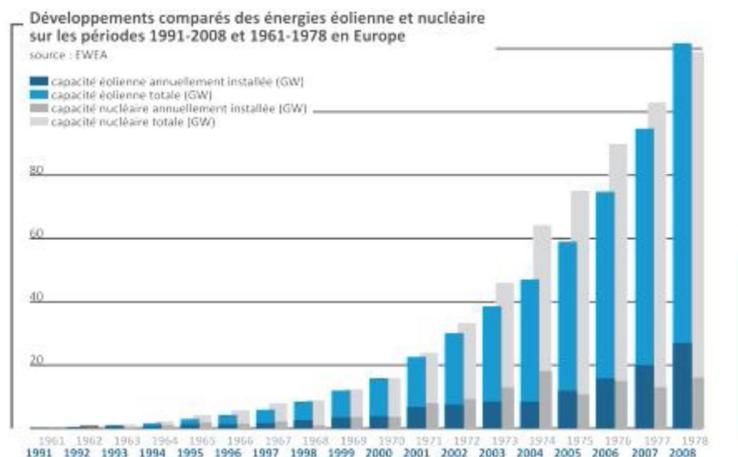


Figure I.4 :Développement d'énergie éolienne dans le monde[2].

I.3.3. En Asie et en Afrique :

L'Inde est le cinquième marché mondial de l'éolien avec plus de 13 000 mW installés fin 2010. Selon l'agence internationale de l'Énergie, la puissance installée pourrait atteindre 65 GW 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 Égypte (430 mW), au Maroc (253 mW) et en Tunisie (54 mW). En Afrique du sud, 7 000 mW sont actuellement en développement [2].

I.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

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

I.4.1. Les avantages :

- ❖ L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- ❖ Bien que ne pouvons pas envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.

- ❖ Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- ❖ Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- ❖ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- ❖ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- ❖ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ❖ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- ❖ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- ❖ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, le coût de l'éolienne à diminuer presque de 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.
- ❖ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est

relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- ❖ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [3].

I.4.2. Les inconvénients:

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

- ❖ L'impact visuel : Cela reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.
- ❖ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.
- ❖ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.

- ❖ La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- ❖ Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [3].

I.5.Ressources éoliennes :

I.5.1. Origine des vents :

L'atmosphère, composée d'oxygène, d'azote et d'eau, est caractérisée par sa pression, sa température et son humidité, dont les paramètres varient avec l'altitude à cause de la rotondité de la terre. Le rayonnement solaire est absorbé de façon très différente aux deux pôles et l'équateur or l'énergie absorbée à l'équateur est très supérieure des deux pôles. Ces variations de température provoquent différentes densités de masses d'air, entraînant ainsi leur déplacement d'une latitude à une autre. Le déplacement de ces masses d'air s'effectue des zones de haute pression vers des zones de basse pression. Ces déplacements sont considérablement influencés par la force de Coriolis, qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement, vers la droite, dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.

Le vent est donc caractérisé par deux (02) variables par rapport au temps [1] :

- La vitesse
- La direction

I.5.2 La force de Coriolis :

A cause de la rotation de la terre, tout mouvement dans l'hémisphère nord semblera se dévier vers la droite, si nous l'observons depuis la terre, dans l'hémisphère sud, des mouvements sont déviés vers la gauche. On appelle cette force de déviation la force de Coriolis (d'après Gustave Gaspard Coriolis 1792-1843). La force de Coriolis est un phénomène visible, les rails, par exemple s'usent plus rapidement d'un côté que de l'autre.

Dans l'hémisphère nord, les vents tendent à souffler dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsqu'ils approchent d'une zone de basse pression. Dans l'hémisphère sud en revanche ils tendent à souffler dans le sens des aiguilles d'une montre autour d'une dépression [1].

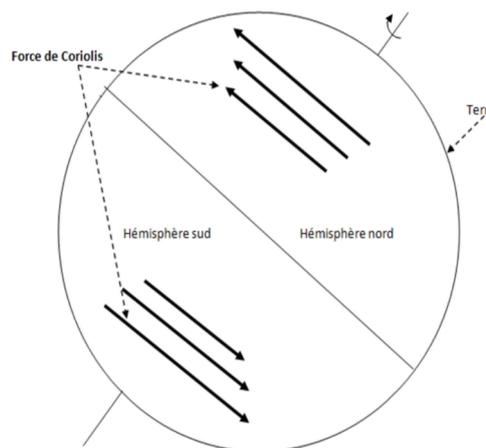


Figure I.5 : La force de Coriolis [1].

I.5.3. Les directions dominantes du vent :

Le tableau suivant représente les directions dominantes du vent en fonction de la latitude

Latitude	90° 60°N	60° 30°N	30° 0°N	0° 30°N	30° 60°N	60° 90°N
Direction	NE	SO	NE	SE	NO	SE

Tableau I.1 : Les directions du vent suivant leurs latitudes.

Il existe plusieurs types de vents dans la nature, parmi ces types, il y a les vents globaux, ou l'air s'élève à l'équateur s'étendant vers le nord et le sud dans la haute atmosphère.

La force de Coriolis joue un rôle très important qui est celui d'empêcher les courants d'air d'aller plus loin dans les deux hémisphères nord et sud. On trouve aussi des vents de surface qui se situent jusqu'à environ 100 m de hauteur. L'influence de la surface de sol sur les vents est importante. En matière d'énergie éolienne ce sont les vents de surface et leur capacité énergétique qui présentent le plus grand intérêt. Quant aux vents de montagne, ils donnent naissance à beaucoup de phénomènes climatologiques intéressants. La brise de vallée en est un exemple. Elle se produit sur les versants exposés au sud dans l'hémisphère nord, le réchauffement des versants et de l'air avoisinant font tomber la densité de l'air, en conséquence l'air commence à s'élever vers le sommet de la montagne produisant ce que l'on appelle une brise montante. La nuit le phénomène s'inverse et une brise descendante se produit [1].

I.6. Critères de choix d'un site éolien :

Les critères de choix d'une implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et de nombre d'unités. Ils nécessitent la présence d'un vent régulier et

diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés), terrain approprié, etc.

I.6.1. Conditions climatiques :

I.6.1.1. Vent :

L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et de la fréquence des vents présents. Un site avec des vents d'environ 30 km/h de moyenne sera environ 8 fois plus productif qu'un autre site avec des vents de 15 km/h de moyenne. Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents.

Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne :

❖ Effet de tunnel :

Entre les grands bâtiments ou dans un col étroit, le phénomène peut être observé. Le vent se trouve comprimé sur le côté exposé au vent du bâtiment ou de la montagne, ce qui fait accélérer considérablement sa vitesse entre les obstacles. Cela implique que, bien la vitesse normale dans un terrain dégagé soit de, disons 6 m/s, elle atteindra facilement 9 m/s dans un couloir naturel. L'installation d'une éolienne dans un tel tunnel est donc une façon intelligente d'obtenir une vitesse du vent supérieure à celle de la zone ambiante. Cependant, afin d'obtenir un effet de tunnel utilisable, le tunnel doit être enclavé de pentes douces, si les collines entourant le tunnel sont très rugueuses et accidentées, il peut y avoir beaucoup de turbulences dans le vent, ce qui fait que le vent change de vitesse et de directions sans cesse et très rapidement[1].

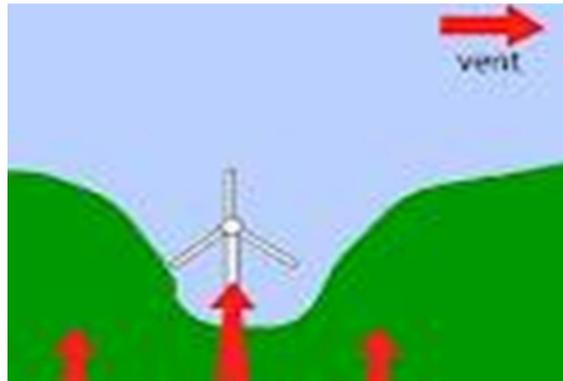


Figure I.6 : Effet de tunnel [1].

❖ Effet de colline

Juste avant d'arriver au sommet d'une montagne, le vent est accéléré et comprimé, et lorsqu'il arrive à l'autre côté, il devient lent et faible. En règle générale, on cherche à installer les éoliennes sur une colline ou une chaîne de hauteurs qui sont plus élevées que le paysage environnant. Surtout, il faut de préférence avoir une vue aussi dégagée que possible dans la direction des vents dominants. Si l'on rencontre souvent des vitesses de vent accélérées sur les collines, c'est à cause de la différence de pression existant à l'avant et à l'arrière de celles-ci. Ainsi, le vent se trouve comprimé par la colline à la face exposée au vent, pour s'étendre ensuite, une fois passé le sommet, vers la zone de basse pression de côté sous le vent de la colline.

Comme on le voit sur la figure (I.7), le vent commence à dévier bien avant qu'il n'arrive à la colline. Ce phénomène est dû à l'étendue assez considérable de la zone de haute pression se trouvant à l'avant de la colline.

Tout comme c'était le cas pour l'effet de tunnel, une colline accidentée ou à pentes raides peut provoquer de fortes turbulences ce qui risque d'annuler l'avantage que l'on compte normalement gagner par une accélération de la vitesse [1].

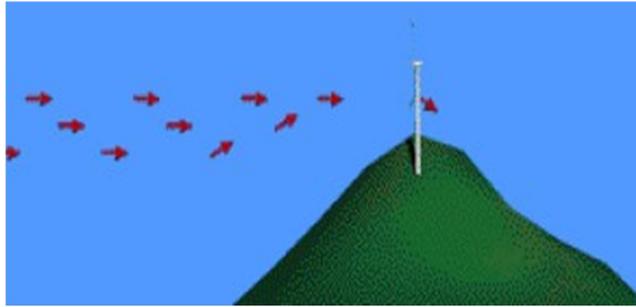


Figure I.7 :Effet de colline [1].

I.6.1.2. Turbulence :

Par définition la turbulence est l'irrégularité de la vitesse et de la direction du vent. En effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent a une valeur comprise entre 10 et 20 km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient à la destruction de l'éolienne ou à la nécessité de la débrayer (pâles en drapeau) pour en limiter l'usure. La vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne. De même, l'axe de rotation de l'éolienne doit rester la majeure partie du temps à la parallèle à la direction du vent. Même avec un système d'orientation de nacelle performant, il est donc préférable d'avoir une direction de vent la plus stable possible pour obtenir un rendement optimal (alizés par exemple). Certains sites proches de grands obstacles sont ainsi à proscrire car le vent y est trop turbulent [1].

I.6.2. Conditions sur les sites d'implantation :

Bien que le vent soit l'élément principal pour l'implantation des éoliennes dans un site donné, il y d'autres conditions que doit satisfaire ce dernier, voici quelques-unes :

- La nature du sol : il doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne. Ce critère n'est pas déterminant car dans le cas d'un sol meuble, des pieux seront alors enfoncés sous les fondations de l'éolienne.
- L'accessibilité du site : il doit permettre le transport des gros éléments de l'éolienne (pales, tour, nacelle) et des grues nécessaires au montage.
- La connexion au réseau électrique : pour cela, les petites fermes d'éoliennes sont le plus souvent situées à proximité d'un poste de transformation haute tension afin de diminuer le coût de raccordement qui est directement fonction de la distance à ce poste. Pour les grosses fermes d'éoliennes, le réseau doit être en mesure de supporter l'énergie produite, et son renforcement est parfois nécessaire (renforcement ou création de poste de transformation).

I.7. Potentiel du vent en Algérie :

Les cartes des vents de l'Algérie, estimées à 10 m du sol et à 25 m du sol sont présentées sur les deux figures suivantes. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune).

On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour d'Oran, Tiaret, In Aménas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s. Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni- Abbes présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (< 3 m/s) [2].

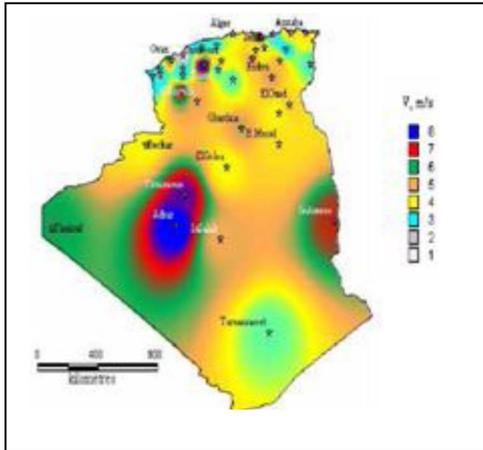


Figure I.8: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol[2].

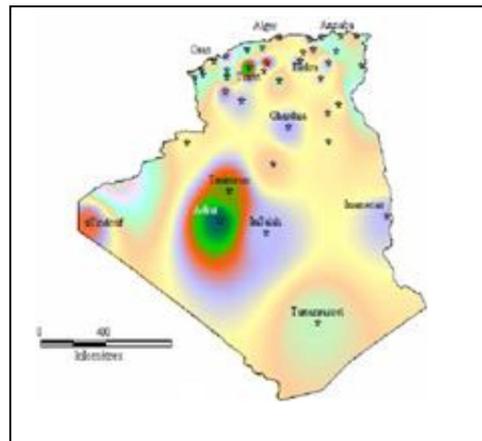


Figure I.9: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 25 m d'altitude du sol[2].

N°	Nom	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V (m/s)
1	Adrar *	0.28	27.82	0.01	5.9
2	Alger	3.25	36.72	0.01	3.2
3	Annaba *	7.82	36.82	0.01	2.4
4	Batna *	6.18	35.55	0.01	4.2
5	Béchar *	-2.23	31.62	0.03	3.6
6	Béjaia *	5.6	36.72	0.03	4.2
7	Beni Abbès	-2.10	30.08	/	1.7
8	Ben Saf *	-1.35	35.3	0.02	2.8
9	Biskra *	5.73	34.8	0.02	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	4.67	36.07	0.01	3.4
11	Chlef	1.33	36.10	0.01	2.8
12	Constantine	6.62	36.10	0.01	2.6
13	Djanet	9.28	24.33	/	2.3
14	Djelfa	3.25	34.68	0.08	2.7
15	El Bayadh	1.00	33.67	0.01	3.9
16	El Goléa	2.87	30.57	/	3.0
17	El Kheiter *	4.70	34.15	0.08	4.6
18	El Oued	6.78	33.50	0.01	3.7
19	Ghardaia *	3.80	32.40	0.03	4.6
20	Guelma	7.43	36.47	/	1.8
21	Hassi Messaoud *	6.15	31.67	0.00	4.1
22	In Amenas	9.63	28.05	/	4.3
23	In Oussera	2.52	35.55	0.08	3.0
24	In Salah	2.47	27.20	/	4.4
25	In Sefra	-0.60	32.75	/	3.0
26	Ksar El Chellala	2.32	35.17	0.08	3.4
27	Maghnia *	-1.78	34.82	0.01	2.7
28	Mascara	0.15	35.22	0.05	2.4
29	Mechria	-0.27	33.55	/	3.8
30	Miliana	2.23	36.30	0.5	2.6
31	Mostaganem *	0.12	35.83	0.01	1.0
32	M Sila *	4.50	35.67	0.03	4.1
33	Oran	-0.62	35.63	0.01	4.1
34	Oum El Bouaghi	7.11	35.87	/	2.1
35	Saida *	0.15	34.87	0.01	2.6
36	Sétif	5.25	36.18	0.01	3.1
37	Skikda	6.90	36.88	0.01	2.9
38	Tamanrasset *	5.52	22.78	0.10	2.9
39	Tébessa	8.12	35.42	0.03	2.8
40	Tiaret	1.47	35.37	0.02	4.7
41	Timimoun *	0.28	29.25	0.01	5.1
42	Tindouf *	-8.10	27.67	0.00	4.6
43	Tlemcen	-1.28	34.95	0.01	2.3
44	Touggourt *	6.13	33.12	0.04	3.3

Tableau I.2 : Vitesses du vent en Algérie[2].

En fin, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest, le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 5.9 m/s. Cependant, on notera l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran [2].

I.8.L'avenir de l'énergie éolienne :

La montée du prix des énergies fossiles a rendu les recherches dans le domaine de l'éolien plus attirantes pour les investisseurs.

La technologie actuellement la plus utilisée pour capter l'énergie éolienne utilise des hélices sur axe horizontal. Certains prototypes utilisent un axe de rotation vertical : une nouvelle technologie à axe vertical est celle du kitewind generator (inspirée du kitesurf) qui, pour capter un vent le plus fort possible, utilise des câbles et des ailes qui peuvent arriver à 800/1000m de hauteur.

La technologie à axe vertical présente certains inconvénients :

L'encombrement spatial est important, il correspond à une sphère d'un diamètre égal à celui de l'hélice, reposant sur un cylindre de même diamètre. Un mât de hauteur importante est nécessaire pour capter un vent le plus fort possible.

Le vent doit être le plus régulier possible, et donc interdit des implantations en milieu urbain ou dans un relief très accidenté.

La vitesse de l'extrémité d'une pale croît rapidement avec sa taille, au risque de causer défauts de fonctionnement et bruits pour le voisinage. Dans la pratique, les pales des grandes éoliennes ne dépassent jamais une vitesse de l'ordre de 100m/s à leur extrémité.

En fait, plus l'éolienne est grande, et moins le rotor tourne vite (moins de 10 tours/minute pour les grandes éoliennes offshores).

Les nouvelles éoliennes en cours de développement visent à aboutir à une technologie qui s'affranchit du bruit, de l'encombrement et de la fragilité des éoliennes à pales, tout en étant capables d'utiliser le vent quelle que soit sa direction et sa force.

De nombreuses variantes sont étudiées par des essais réels en grandeur nature. Certaines éoliennes sont de petite taille (3 à 8 mètres de largeur, 1 à 2 mètres de hauteur), avec pour objectif de pouvoir les installer sur les toitures terrasses des immeubles d'habitation dans les villes, ou sur les toitures des immeubles industriels et commerciaux, dans des gammes de puissances allant de quelques kW à quelques dizaines de kW de puissance moyenne. Leur vitesse de rotation est faible et indépendante de la vitesse du vent. Leur puissance varie linéairement avec la vitesse du vent, qui peut varier de 5km/h à plus de 200km/h, sans nécessiter la célèbre "mise en drapeau" des éoliennes à pales [8].

I.9. Le stockage:

Énergie intermittente et incontrôlable, l'éolien a besoin de grandes capacités de stockage :

1. Pour stocker l'énergie éolienne en site isolé. Ainsi, une communauté qui s'alimentait à 100% avec un groupe diesel, après l'installation de 2 éoliennes et de batteries de grande capacité, s'alimente maintenant à 86% en éolien. Le diesel n'assure que le complément de 14%. On voit qu'avec ces batteries de grande capacité on peut développer l'éolien au-delà de ce qui se fait actuellement. La seule limite est l'investissement en capacité de stockage de l'électrolyte; c'est-à-dire jusqu'où on est décidé à aller dans ce domaine.
2. En tant que stockage tampon en complément de la production d'un parc éolien. Lorsque la production éolienne faiblit, le déstockage fournit le complément pour garder la production finale quasi stable. Lorsque la production éolienne est suffisamment forte, il y a reconstitution du stock. Ainsi les 2 courbes de production éolienne et stockage sont opposées et complémentaires. La somme des deux fournit au réseau une courbe de production "lissée" (comme au parc éolien de Sapporo au Japon).

Sur le plan purement technique, le dernier retour d'expérience sur une tentative visant le 100% de production d'électricité d'origine renouvelable, initiée en Allemagne en 2006 à la demande de Mme Merkel, démontre qu'il est possible d'y parvenir. Ce qui pourrait permettre à terme de rendre l'Allemagne totalement indépendante en énergie électrique. Pour tenter cette expérience, le stockage de type STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) a été utilisé pour la partie éolienne, exactement comme le fait la France avec le nucléaire pour adapter la production peu souple des centrales à la variabilité de la demande journalière.

Aux États-Unis, une entreprise conçoit de nouvelles éoliennes qui produisent de l'air comprimé au lieu de l'électricité. Dans la nacelle des éoliennes au lieu d'un alternateur se trouve donc un compresseur d'air. L'air comprimé est stocké et permet de faire tourner un alternateur aux moments où les besoins se font le plus sentir. Du point de vue du stockage de l'énergie, cette façon de faire impose une conversion d'énergie (de l'air comprimé vers l'électricité, avec un rendement réduit), mais permet de positionner la production électrique sur le pic de consommation, où l'électricité est payée plus chère, avec une conversion de moins que par le processus classique (électricité vers le stockage puis du stockage vers l'électricité). Certains pensent même que l'on pourrait utiliser directement l'air comprimé ainsi produit pour alimenter des voitures automobiles propulsées avec ce fluide [8].

Chapitre II

Les systèmes éoliens

II.1. Définition du système éolien :

Un système éolien ou aérogénérateur, dit encore éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique. La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal, la part de marché représentée par les systèmes à axe vertical étant faible. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parc d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines [1].

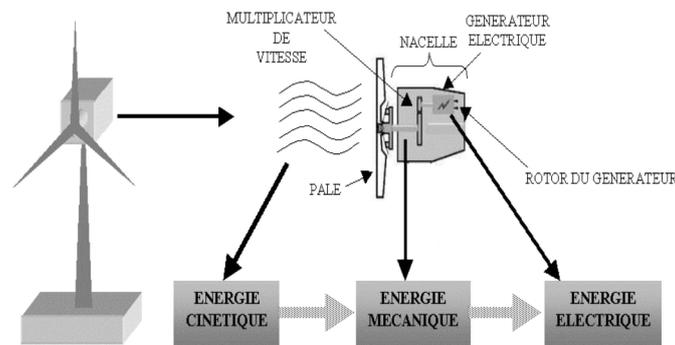


Figure II.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent[5].

II .2. Classification des Aérogénérateurs :

Généralement, on classifie les éoliennes suivant l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue ainsi deux grandes familles [6]:

- Les aérogénérateurs à axe horizontal
- Les aérogénérateurs à axe vertical

II.2.1. Eoliennes à axe vertical :

Elles ont été conçues pour s'adapter au mieux avec les contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain.

Grâce à ce design, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins sensibles à ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer au design des bâtiments. Leurs faiblesses résident principalement dans la faible maturité du marché (coûts d'investissement élevés).

En raison de leur petite taille, l'énergie produite est faible mais s'adapte bien aux besoins des consommateurs d'un logement social. Elles trouvent donc leur place dans le milieu urbain.

Les principaux aérogénérateurs à axe vertical sont le rotor de SAVONIUS et le rotor de DARRIEUS [6].

II.2.1.1. Le rotor de SAVONIUS :

Ce type d'aérogénérateur utilise la traînée et est constituée de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s.

Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence. De plus, ce design ne fait pas beaucoup de bruit et finalement convient bien au milieu urbain (Figure II-2) [6].



Figure II.2: éoliennes à axe vertical de type SAVONIUS [6].

II.2.1.2 Le rotor de DARRIEUS:

Inventé par l'académicien français DARRIEUS au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de traînée d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de DARRIEUS: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique



Figure II.3: éoliennes à axe vertical de type DARRIEUS [6].

II .2.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripales, 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 d'équilibrage de la machine par rapport au bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important. Deux types de configurations peuvent être rencontrés :

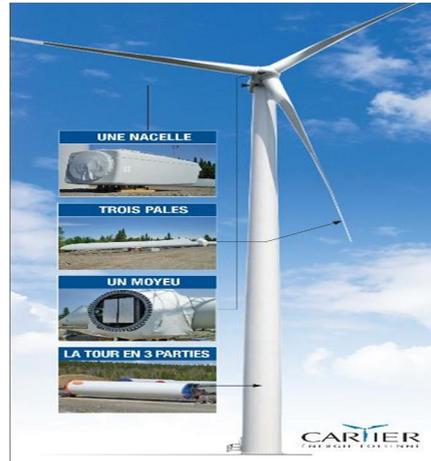


Figure II.4: Eolienne à axe horizontal [6].

II.2.2.1. Eoliennes sous le vent (aval) :

Dans ce type d'éoliennes le vent souffle derrière les pales comme le montre la figure (II.5). L'avantage de ce montage réside dans le fait que les pales de rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône ; par fort vent la flexion des pales enlève une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Ces éoliennes ont donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent, cependant, le pylône bien qu'il soit plus petit constitue un obstacle au vent ce qui augmente le risque de rupture de la pale et génère une production fluctuante d'électricité.

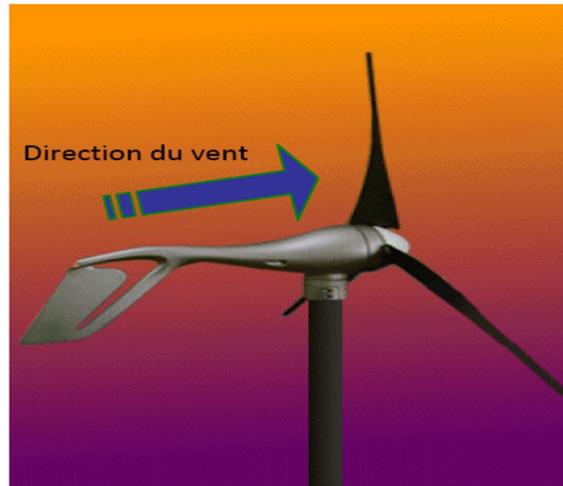


Figure II.5 : éolienne sous le vent, tripale flexible[1].

II.2.2.2. Eoliennes face au vent (amont) :

Ce sont les plus répandues. Le rotor est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône (figure (II.6)). A l'arrière du pylône, il y a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône.

Il en est de même devant le pylône mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylône. Les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par fort vent. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours face au vent[1].

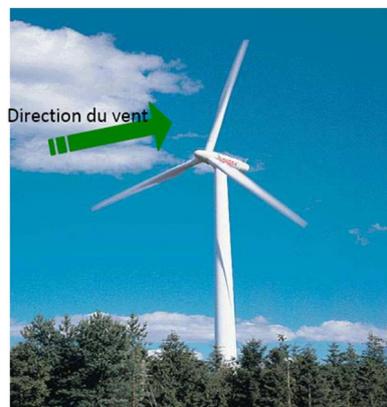


Figure II.6 : Eolienne face au vent (amont) [1].

II.3. Caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal:

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire. Nous présentons dans ce qui suit dans l'ordre de construction les différentes parties d'une éolienne :

II.3.1. La nacelle :

Contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique : les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur se trouvent : la boîte de vitesse, la génératrice, les systèmes de contrôles, le capteur de température, le capteur de vibration et le capteur de vitesse. La nacelle se situe à environ 60 mètres au-dessus du sol [1].

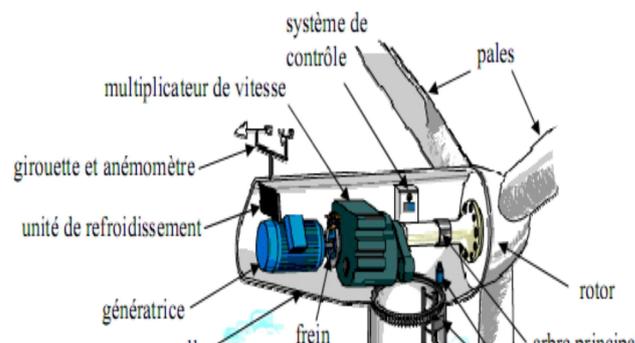


Figure II.7 : les principales composantes de la nacelle [1].

Elle comporte donc les éléments suivants :

I.3.1.1. Le rotor :

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré du diamètre du rotor[3].



Figure II.8:Rotor d'une turbine[3].

II.3.1.2. La girouette et l'anémomètre :

La girouette et l'anémomètre permettent de connaître la direction et la vitesse du vent, Ils participent ainsi à l'autonomie presque complète des éoliennes, ils sont souvent associés à un dispositif d'orientation de l'éolienne [1].



Figure II.9 : La girouette et l'anémomètre [1].

II.3.1.3. Le dispositif d'orientation :

Il est situé sous la nacelle, il permet d'orienter les pales face au vent d'après les données recueillies par la girouette et l'anémomètre. Il est principalement composé d'un puissant moteur capable de faire pivoter toute la partie supérieure de l'éolienne. [1]

II.3.1.4. Le système de freinage :

Il est très important dans une éolienne, le dysfonctionnement des freins peut être fatal à l'éolienne. Le freinage a d'ailleurs été l'un des premiers problèmes rencontrés par les constructeurs lors des débuts des éoliennes. Pour des vents trop forts le générateur s'emballe et peut alors détruire de nombreux composants de la nacelle. Ainsi le système de freinage s'impose pour des vents dépassants les 90km/h, il permet alors d'empêcher le rotor de tourner [1].

II.3.1.5. L'arbre principal :

Cet axe est directement entraîné par le rotor (principalement par les pales), il tourne à basse vitesse mais avec beaucoup de force (couple fort). Il est relié ensuite à un multiplicateur [1].



Figure II.10 : L'arbre principal d'une éolienne [1].

II.3.1.6. Le multiplicateur :

C'est un convertisseur de puissance, il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique, en multipliant parfois par 70 la vitesse de rotation initiale. Il est constitué d'un assemblage d'engrenages. La vitesse de rotation d'une roue à une autre est multipliée par le nombre de dents de la plus grande roue sur le nombre de dents de la plus petite. Le rendement est variable suivant la puissance transmise, mais il est environ de 97%.

La lubrification peut se faire par barbotage ou par injection forcée. Le refroidissement est souvent à air. Le multiplicateur est monté sur plots élastiques (plots de caoutchouc) pour amortir les vibrations et limiter la transmission du bruit à la structure porteuse [1].

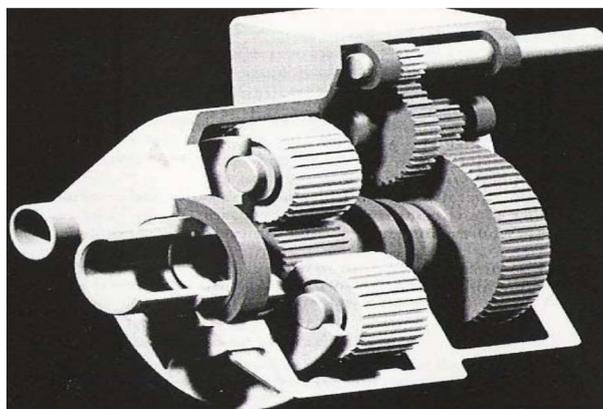


Figure II.11 : Le multiplicateur [1].

3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

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

II.3.1.7. L'arbre secondaire :

Comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

II.3.1.8. La génératrice :

La génératrice convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les génératrices des éoliennes doivent pouvoir fonctionner avec une source de puissance (c.-à-d. le rotor de l'éolienne) qui fournit une puissance mécanique (un couple) très fluctuante. Il faut refroidir les génératrices lorsqu'elles travaillent. Sur la plupart des éoliennes, on assure ce refroidissement en enrobant la génératrice dans un conduit et en installant dans celui-ci un grand ventilateur qui refroidit à l'air. Il y a cependant un petit nombre de constructeurs d'éoliennes qui utilisent des génératrices refroidies par eau. Ces génératrices peuvent être construites de façon plus compacte ce qui comporte quelques avantages au niveau du rendement électrique, mais elles requièrent en même temps l'installation d'un radiateur dans la nacelle afin de se débarrasser de la chaleur provenant du système de refroidissement par liquide.

II.3.2. Le mât :

Composé de trois parties vient se fixer sur la partie supérieure de la fondation revue à cet effet, en général, le mât est composé de trois parties permettant un transport plus simple.

Il est fixé à la fondation par des boulons, partiellement serrés, permettant ainsi une certaine extension de la structure soumise en permanence à de nombreuses forces. Le mât sert également à protéger les immenses câbles électriques qui passent à l'intérieur, ainsi l'électricité produite est acheminée vers le réseau principal.

II.3.2.1.Type du mat de l'éolienne :

La figure (II.12) présente trois types de tours d'éoliennes qui sont largement rencontrés pour les éoliennes à axe horizontal: tour en treillis, tour tubulaire et tour hybrides.

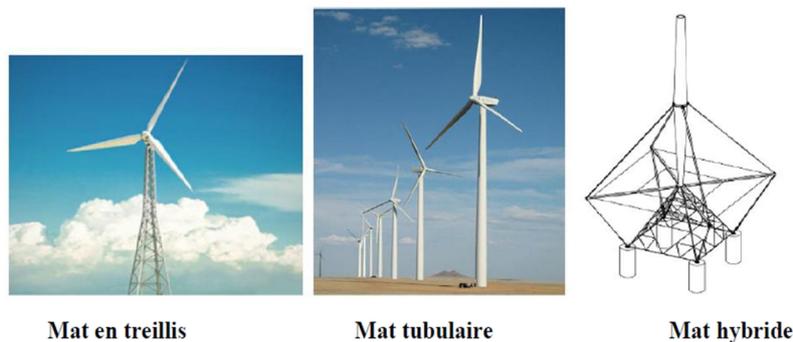


Figure II.12 :Type du mat (tour) de l'éolienne [7].

II.3.2.1.1. Autoportante ou Guy-câblé:

Chacun des types mentionnés ci-dessus des tours peuvent être effectuées en « posture libre » ou un « Guy-câblé ».

Utiliser des câbles de haubanage peut faire baisser le coût initial de la tour, car cela nécessiterait moins de matières pour la tour. Beaucoup de petites éoliennes utilisent des haubans pour cette raison, toutefois, les coûts de maintenance pour

les haubans ajoutés à d'autres coûts de l'opération, doit donc être évitée si possible. En outre, les haubans nécessitent une plus grande empreinte (surface virtuelle occupée) et les fondations supplémentaires. Par conséquent, il peut présenter un problème avec l'accessibilité des terres et l'utilisation qui peut ne pas convenir dans les zones agricoles.

II.3.2.1.2. Mat en treillis :

Une tour en treillis est fabriquée à partir de fermes (morceaux de cornières ou de barres) ou des cadres qui sont boulonnés ou soudés ensemble comme le montre la figure (II.12). En général, le coût initial de construction d'une tour en treillis est inférieur à la tour tubulaire, car il nécessite moins de matériaux pour une rigidité similaire. Bien que le coût des matériaux de départ puisse être plus faible pour le tour en treillis, les coûts d'assemblage et de maintenance peuvent être plus élevés car chaque boulon doit correspondre à un cahier des charges et doit être vérifié périodiquement. Contrairement à la tour tubulaire, la dimension de base n'est pas retenue par la limite de taille de l'article (voir tour tubulaire). En outre, le coût de fondation peut être inférieur à la tour tubulaire en raison des fondations sur pied peu coûteux à chaque pied châssis utilisé. Esthétiquement, la tour en treillis est moins attrayante. Ce qui représente un facteur important.

II.3.2.1.3. Mat tubulaire :

La tour tubulaire est illustrée à la figure (II.12) Il s'agit d'un tuyau de section transversale circulaire. De nombreuses tours tubulaires sont soit effilées (conique) ou gradin qui a un diamètre augmentant vers le bas. En outre, l'épaisseur de la paroi peut varier le long de la hauteur de la tour afin de sauver du matériau tout en satisfaisant les exigences structurelles. Des flasques boulonnées sont couramment utilisées pour joindre les sections de la tour et de garantir la fixation de la tour à la fondation.

La tour tubulaire possède de nombreux avantages sur la tour en treillis. La zone fermée de la cavité tour tubulaire est utile. Premièrement, il fournit un couvert, aire protégée pour l'escalade pour accéder à l'éolienne dans de mauvaises conditions météorologiques. En outre, il fournit une surface couverte pouvant accueillir de nombreux composants électriques. Dans un climat, zone froide venteux ou humide, il s'agit d'une caractéristique importante. Il fournit un certain niveau de sécurité en limitant l'accès à la turbine contrairement à la tour en treillis. En outre, il est plus facile d'entretien. Bien que le coût matériau de départ puisse être supérieur à la tour en treillis, il ne repose pas sur de nombreuses connexions boulonnées qui ont besoin d'être vérifiés périodiquement. Esthétiquement, elle est plus attrayante que la tour en treillis. Les pays européens ont toujours favorisé les tours tubulaires pour des raisons esthétiques. Toutefois, pour les éoliennes de très grandes dimensions, le transport peut être un défi. Les sections des tours tubulaires sont fabriquées puis assemblés sur le site de l'éolienne. La limitation actuelle de la taille de la section tubulaire est de 4,3 m de diamètre [7].

II.3.2.1.4. Mat hybride :

La tour hybride combine différentes configurations de la tour de l'éolienne. La tour hybride illustrée à la figure (II.12) est un exemple. Elle est appelée «la conception restante» combinant de tubes d'acier, de poutres d'acier et de Guy-câblée. Le nom vient de l'analogie de la méthode de soutien d'un mât de voilier. Pour cette conception, les haubans peuvent être utilisés sans nécessiter de fondations supplémentaires. Comme il est mentionné, le type tubulaire a une limitation de la section la plus importante de la taille (environ 4,3 m pour les grandes turbines). Cette limite peut se traduire par soudage sur site et la fabrication qui peuvent compromettre la qualité de la tour. Le transport des sections de plus grand diamètre peut être très coûteux aussi [7].

II.3.2.2.Tendance conception de Tour :

À l'heure actuelle, le type le plus commun est la tour autoportante tubulaire pour les grandes éoliennes et il devrait être plus populaire dans l'avenir. Pour les petits tours d'éoliennes, l'utilisation de haubans sur le pylône tubulaire est largement considérée.

II.3.2.3.Hauteur de tour l'éolienne :

La hauteur de la tour est un paramètre dépendant du site car il est fonction des caractéristiques du vent qui est fonction du site. L'optimisation de conception pour le moindre coût pourrait favoriser les hautes tours dans les zones de vents faibles et les courtes tours dans les zones de vent fort. Cependant, s'il ya des obstacles comme les arbres ou les objets de grande taille qui peuvent rendre l'écoulement du vent plus turbulent, une plus haute tour sera nécessaire. En outre, de hautes tours peuvent protéger la turbine de l'effet de cisaillement du vent si le site est souvent le siège d'un important taux de cisaillement du vent.

En général, plus grande est la tour, plus puissante est l'énergie produite par le système. Selon, la hauteur de la tour qui doit être d'au minimum de 20 m [7]. Plus favorable encore, la hauteur de la tour devrait être supérieure à 24 m pour éviter toute turbulence à proximité du sol.

Par rapport à la dimension du rotor, il est généralement de l'ordre de 1 à 1,5 fois le diamètre du rotor pour une turbine à axe horizontal en vent normale. Pour une éolienne de petite puissance, la hauteur du pylône par rapport au diamètre du rotor est beaucoup plus élevée afin de bénéficier de la vitesse du vent supérieure à une hauteur plus élevée.

En effet, la demande de la plus haute tour est en train d'augmenter. Les défis qui viennent avec la conception de la plus haute tour sont pour la rendre structurellement sûre à un coût raisonnable en considérant les exigences imposées par l'assemblage et le transport de l'installation. La grande tour a besoin de grandes grues pour l'installation et il peut être difficile à les

transporter. L'utilisation de grues peut-être même impossible en fonction de l'emplacement d'installation.

L'idée d'une tour à montage automatisé a été évaluée et a montré un certain potentiel pour résoudre ce problème pour de hautes tours.

Auto-tours ériger utilise des mécanismes tels que les mécanismes de télescopage, tour-dispositifs d'ascension, un cadre ou levage-up des systèmes.

II.3.3. La fondation :

Est composée d'épais blocs de béton armé (béton renforcé par une structure métallique) d'environ 100 tonnes voir plus, enterrés à 5 à 6 mètres de profondeur. Au-dessus de cette fondation, une autre dalle est coulée afin de fixer la première partie du mât (illustré sur la figure (II.13)).



Figure II.13 : Les fondations de grandes éoliennes[1].

II.4. le principe de fonctionnement d'une éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite

par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV.

Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public [3].

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [3].

Chapitre III

Recherche bibliographie

III.1: recherche bibliographie :

Suite à une recherche minutieuse dans la littérature, nous présentons dans ce chapitre quelques études importantes permettant d'illustrer les techniques et les méthodes de détermination de cout de fabrication, de la nature du matériau et de la structure d'un mat d'une éolienne.

Tout d'abord, parmi les études trouvées dans la littérature, nous citerons les travaux de la référence [9], les auteurs calculent la structure d'un mat et de son comportement face aux charges statiques et sismiques, ils présentent des résultats concernant la capacité portante et le comportement sismique d'une tour prototype en acier d'une turbine éolienne de 450 kW, son axe de transmission de puissance est horizontal.

La structure du palier de charge principale de la tour d'acier se situe à peu près à 38 m de haut et se compose de parois en parties cylindriques et coniques, les différents parties de la paroi sont reliés entre eux par des anneaux circulaires boulonnés (des brides intérieures).

Le comportement et la capacité de chargement de la structure ont été étudiés à l'aide de l'outil de calcul en éléments finis. Des études comparatives ont été effectuées et des conclusions utiles sont tirées concernant l'efficacité et la précision des différents modèles utilisés. Il s'est avéré que les modèles analytiques simplifiés, comme celles recommandés par les codes de calcul des bâtiments, ne peuvent pas prédire avec exactitude les charges critiques liées à des phénomènes locaux de flambage pour ce type de structures.

Toutefois, si de tels modèles sont utilisés, un grand soin doit être exercé dans l'intégration appropriée des conditions aux limites aux extrémités de chaque section de la structure. Par ailleurs des modèles numériques approximatifs peuvent également produire des résultats assez précis pour

l'analyse sismique. Dans la plupart de ces types de structures de tours une analyse sismique ne produit aucune réaction critique.

Une autre étude [10], propose la conception et le calcul de modèle d'un prototype de tour d'éoliennes en acier d'une puissance de 1 MW. La structure est de 44 m de haut et a une forme tubulaire à section variable et d'épaisseur variable de la paroi sur toute sa hauteur. La matière utilisée est un acier de nuance S355J2G3.

Pour la simulation de sa réponse structurelle, deux modèles d'éléments finis ont été développés. L'analyse du comportement de la tour a considéré, la gravité, les charges dus au fonctionnement, des charges sismiques et les charges du vent selon les normes Eurocodes pertinentes. En particulier, en ce qui concernant le chargement sismique, une analyse dynamique a été réalisée selon le Code grec antisismique (EAK 2000).

La réponse de la structure a été vérifiée contre la fatigue en appliquant la méthodologie respective d'Eurocodes. Il est à noter que l'utilisation d'un modèle simplifié statique linéaire est suffisante pour le calcul de la réponse de base et des valeurs propres de la structure. Toutefois, il ne suffit pas pour la conception dû au fait que les concentrations de contraintes locales sont négligées dans ce modèle. Il est également à souligner que, compte tenu de la norme actuellement disponible des normes Eurocodes, les calculs concernant l'analyse de flambage de la coquille de la tour n'est pas très fiable et, par conséquent, il doit être manipulé avec précaution.

Les calculs concernent les charges, d'un vent extrême combiné aux charges extrêmes de fonctionnement de la structure. Par ailleurs, l'étude sismique n'est critique que pour le cas de la construction de tours dans une zone sismique dangereuse (zone III ou IV), loin de la zone côtière avec un souterraine d'un sol moyen ou doux. Quant au dimensionnement à la fatigue, il est à noter

que ce sont les caractéristiques dynamiques de la structure qui restent critiques dans la conception globale de la tour d'acier.

Une autre étude [11] considère une conception d'une tour en acier d'une éolienne basée sur la minimisation du coût. La tour d'éolienne examinée est construite à partir d'anneaux rigidifiés légèrement conique enveloppé en acier soudé. Cette coquille de 45 m de haut est modélisée par des segments empilés, trois coques cylindriques de 15 m de longueur et ayant chacun un diamètre moyen et une épaisseur constant.

La charge du vent est calculée conformément à la norme de l'Eurocode 1 partie 2-4. Les contraintes de conception de la coque concernent le flambement et le voilement local des anneaux constituant la tour. Les rigidifications des anneaux sont nécessaires pour empêcher l'ovalisation de la tour. Il est pris en compte dans les calculs le coût de fabrication, le coût de traitement pour former les coquilles dans des près-formes cylindriques, ainsi que le coût pour assembler et souder les segments. La fonction de coût à minimiser comprend le matériel et les coûts de fabrication. L'épaisseur de la coque optimale, le nombre de raidisseurs et les dimensions des raidisseurs sont calculées selon la méthode Rosenbrock de recherche directe de minimisation, la fonction est complétée par une discrétisation supplémentaire pour tenir compte de profils disponibles.

Les résultats indiquent que la solution coût minimum correspond au nombre minimum de d'anneaux raidisseurs. La procédure proposée peut être considérée comme une base de référence pour la détermination de modèles les moins coûteux de tours légèrement coniques et qui satisfont aux exigences structurelles de structures élancées principalement chargées par flexion due à des charges dynamiques.

Dans les travaux de la référence [12], les auteurs s'intéressent au calcul de l'influence des défauts et fissures sur le mat. Ils proposent une analyse de l'intégrité structurale de tours tubulaires structurelles (c.-à-d. des tours d'éoliennes et des tours de projecteurs) avec absence de défauts de pénétration sur leurs soudures bout à bout circulaires. La méthodologie présentée est particulière à l'analyse de l'absence de défauts de pénétration dans certaines sections de plusieurs tours après le processus de construction. Il est également analysé la façon dont ces défauts affectent l'aptitude au service de tours au cours de leur durée de vie théorique (20 ans).

La méthodologie (basée sur l'utilisation des diagrammes d'évaluation de Défaillance, de DCP) peut facilement être extrapolée à l'évaluation des autres types de défauts de tours. Ces principales hypothèses consistent à établir que les défauts se comportent comme des fissures internes avec certaines géométries et aussi que la fracture et la fatigue sont les processus clés qui influent sur l'intégrité structurelle des tours. Ensuite, c'est la taille de fissure résultant admissible, correspondant à la durée de vie de la tour, pour les différentes sections analysés et pour les différentes géométries des fissures considérés qui est déterminé.

Dans les travaux de la référence [13], les auteurs présentent une étude pour prévenir des accidents dus aux séismes. Les mécanismes susceptibles de causalité sont examinés dans la perspective de gestion des risques. Les données pour l'analyse de cas sont collectées à partir des rapports originaux de conception de la tour, du code de conception de tours, des dossiers de construction et de documents des données de l'historique de la vitesse du vent et de l'analyse structurelle.

Cette étude examine pour la première fois les causes de l'effondrement d'une tour éolienne à Taiwan sur la base de documents officielles collectés qui concerne, les résultats analytiques, des expériences de laboratoire, et le résultat

du test d'hypothèse. Cette enquête aborde les causes possibles de l'effondrement de la tour et présente des suggestions pratiques pour la gestion des risques de tours d'éoliennes et les futurs plans d'action pour les domaines de l'évaluation de la conception structurale, de construction et de gestion de la qualité, et les documents d'ingénierie.

En termes de gestion des risques, l'identification des causes principales de l'effondrement, il faut comprendre les risques associés à ces causes, et générer des plans d'action qui permettent aux gestionnaires de projet pour atténuer les risques ou d'employer des mesures de contrôle. Cette étude identifie les vents forts, la force insuffisante des boulons lors de la construction. Les plans d'action proposés qui permettent d'atténuer ces causes seront très utiles pour les futures conceptions et la planification de la construction.

Par conséquent, les mécanismes de rupture doivent être identifiés et des preuves fiables doivent être préservées. En analysant les particularités de la construction, des procédures de conception et de gestion du système, la gravité d'une défaillance similaire peut être efficacement minimisée dans l'avenir.

Dans la référence [14], les auteurs proposent une étude théorique pour améliorer le rapport cout/rendement. La tour est une composante essentielle d'un système éolien avec son coût s'élevant à environ 30% du coût global d'installation. L'article en question examine la performance relative des solutions tour en acier et de béton pour une sélection de hauteurs et des vitesses de vent au moyen d'un modèle numérique.

Pour chaque cas, les éléments d'aérogénérateur de 5 MW de puissance sont utilisés pour modéliser les composantes pris en charge par la tour. L'approche lagrangienne est utilisée pour établir les équations du mouvement du système dynamique, permettant le couplage de la tour et de son rotor.

L'analyse est effectuée pour une gamme de hauteurs de tour typiques de 88 à 120 m. La comparaison de la performance relative des solutions de tours est présentée selon deux courbes de performance. Ce travail illustre les caractéristiques probabilistes de dépassement d'état limite en fonction des charges dus au vent.

Dans la référence [7], Le but du travail est la proposition d'une conception d'une tour d'éolienne de petite taille. Il s'agit de la conception d'un mat qui peut être facilement installé et désinstallé.

La solution proposée consiste en un mat reposant sur un palier pivotant. Cette solution a les avantages suivants : le non nécessité de gros moyens pour son implantation (une grue par exemple) ; de plus il donne facilement l'accès à la nacelle par la mise à terre par pivotement de la tour.

La vérification de la résistance mécanique de la tour proposée nécessite la modélisation et l'évaluation des différents efforts supposés agir sur la structure. Pour cela il est commencé par les efforts générés par le fonctionnement de la turbine, ensuite il est considéré l'effet direct du vent sur la tour. L'utilisation du calcul par éléments finis a permet de donner les contraintes normale maximales et les déflexions maximales dans le cas de sollicitations maximales de fonctionnement et lors de l'installation de la tour. Il est vérifié que dans tous les cas les contraintes sont très loin des valeurs ultimes du matériau.

Chapitre IV

Cas d'application

IV.1. Introduction :

Dans cette partie du mémoire sera considérée une tour d'éolienne d'une puissance de 1.65 MW. Elle sera le sujet de notre étude. Il faut commencer par une modélisation géométrique de la tour. Par la suite, il est nécessaire de modéliser les différentes sollicitations subit par la structure lors de son fonctionnement, Il est bien sûr considérer une situation de sollicitation extrême auquel la structure doit faire face en gardant son intégrité. L'outil de calcul étant la méthode des éléments finis, ce qui oblige de passer par les étapes classiques de choix d'élément, de maillage, de conditions de limite et les sollicitations de fonctionnement. Les paramètres calculés sont la déflexion de la tour, la contrainte équivalente de Von Mises ainsi que les réactions au sol. Par ailleurs, les sollicitations sont calculées selon les normes en vigueur.

IV.2. Géométrie de la tour:

La tour sujet de notre étude est celle utilisée pour une 'éolienne de puissance nominal de 1,65 MW de marque Vestas (producteur mondial danois d'éoliennes). Elle est fabriquée en acier, sa section est circulaire, les dimensions de cette tour sont réels. Elle est composé, comme illustré sur la figure (IV.1) ; de quatre parties composées de petites pièces soudées ensemble. En bas de la tour est conçue une porte qui permet l'accès à l'intérieur et à la nacelle par un ensemble d'escaliers pour effectuer les interventions et les réparations éventuelles. La hauteur de la tour est de 78,23 m, alors que le moyeu est placé à une hauteur de 80 m. Les trois premières sections ont un diamètre de 3.65 mètres, alors que la quatrième section est de forme conique. Les Figure (IV.1) et figure (IV.2) montrent les détails de base et de la géométrie de la tour (diamètre, l'épaisseur et la longueur de toutes les pièces), respectivement.

L'acier utilisé est conforme à la norme ASTM A709 avec une limite d'élasticité nominale de 345 MPa. Selon la même norme la base qui est de 17,5 m de haut de la tour Vestas est de catégorie 3 alors que le reste de la tour est de classe 4 [15].

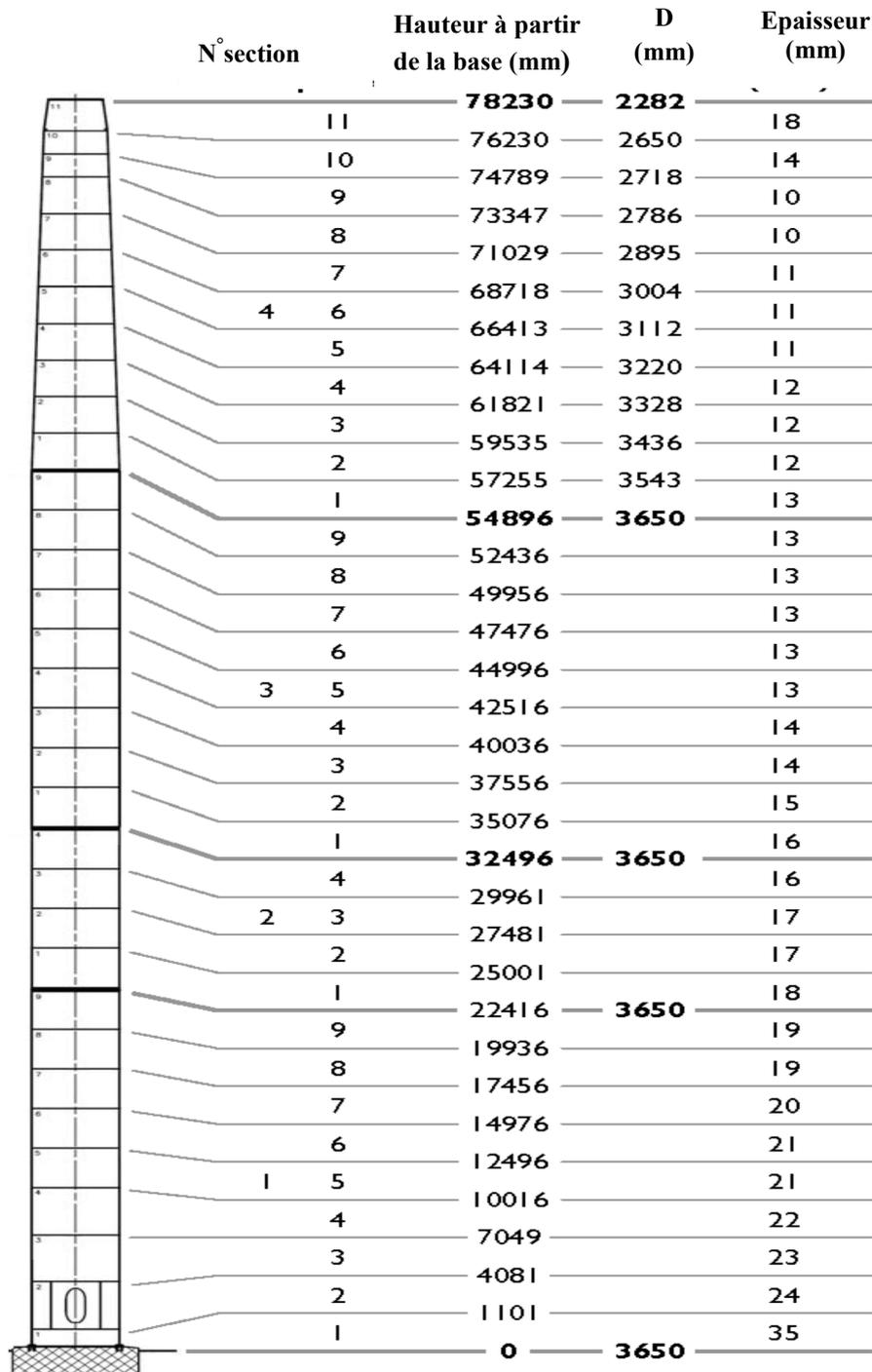


Figure IV.1 : Dimensions de la tour d'éolienne et sa disposition[16].

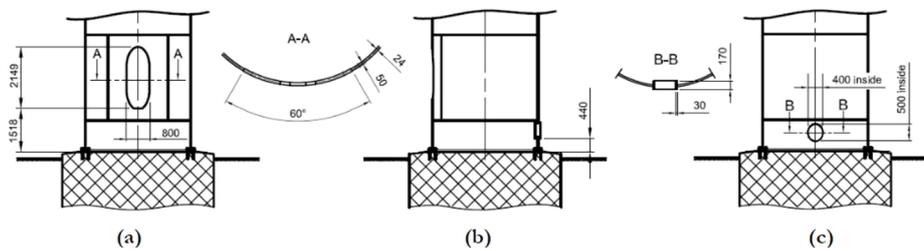


Figure IV.2 : Détails à la base de la tour de l'éolienne Vestas[16].

(a) vue de face / porte (b) vue de côté/ porte (c) Vue arrière / trou de câble

IV.3. Modélisation des chargements :

Dans ce paragraphe nous allons définir et exposer les différentes sollicitations qui s'exercent sur l'éolienne et qui sont essentiellement en nombre de quatre.

IV.3.1. Le poids :

Le poids de tour est calculé par le logiciel ANSYS à partir de la géométrie et de la densité de l'acier pris égale à 7850 kg/m^3 . Le poids de la nacelle vaut 52 tonnes alors que le rotor a un poids de 43 tonne. Ces derniers sont considérés comme des actions ponctuelles placées à la hauteur de moyeu c'est-à-dire à 80 m. Le poids de la nacelle passe par l'axe de la tour alors que le poids du rotor a une excentricité de 3.44m entre l'axe de la tour. Le centre de masse de la tour est à 52,73 m au-dessus du sol [16].

IV.3.2. Action du vent sur le mat:

La deuxième action pouvant s'exercer sur la tour de l'éolienne est celle du vent. Pour déterminer ses différentes caractéristiques, nous appliquons le règlement Algérien RNV 99 [17], qui définit les effets du vent sur les constructions et qui donne les paramètres à considérer dans les calculs en relation.

Le calcul de la charge du vent sur la tour fait intervenir son diamètre extérieur D , la pression dynamique P_d et le coefficient de traînée C_d [18] :

$$u = C_d P_d D \quad (\text{IV.1})$$

Pour aller dans le sens de la sécurité, nous retenons les pressions dynamiques correspondant à la région la plus défavorable de l'Algérie (zone III)[17], est calculée par la formule de Bernoulli suivante :

$$P_d = 0.5 \rho V^2 \quad (\text{IV.2})$$

Où :

ρ : (en kg/m^3) est la masse volumique de l'air ($\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$) ;

V : la vitesse moyenne du vent ($V = C_t C_r V_{\text{réf}}$);

C_r : est le coefficient de rugosité (RNV 99 chapitre 2, § 4.2);

C_t : est le coefficient de topographie (RNV 99 chapitre 2, § 4.3);

$V_{\text{réf}}$ (en m/s) : est la vitesse de référence (RNV 99 annexe 1).

Pour le site plat, les régions lisses et sans obstacles et pour la zone III selon la norme algérienne, on obtient les paramètres $C_t = 1$, $V_{\text{réf}} = 31 \text{ m/s}$.

Donc, pour déterminer le coefficient de traînée C_d il faut premièrement, calculer le nombre de Reynolds à partir la formule suivant :

$$R_e = \frac{DV}{\nu} \quad (\text{IV. 3})$$

ϑ (en m^2/s) : est la viscosité cinématique de l'air ; dans le cadre de DTR (le document technique réglementaire)[17], on prendra $\vartheta = 15 \times 10^{-6} m^2 / s$.

Le coefficient C_d est donné par les graphes en fonction du nombre de Reynolds Re (voir figure (IV.3)).

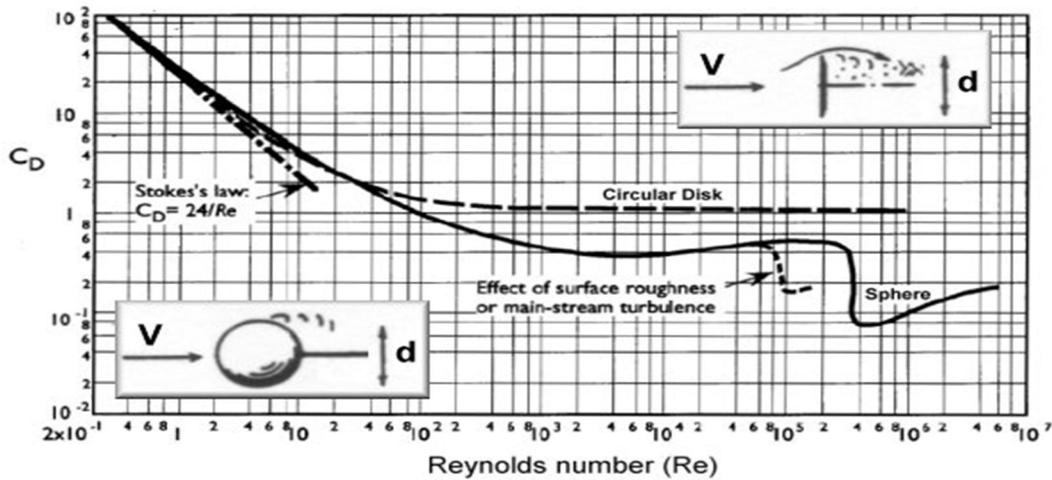


Figure IV.3 : Coefficient de traînée en fonction de nombre de Reynolds[17].

La tour ayant trois parties dont le diamètre est fixe, alors que la dernière partie est de forme conique, l'intensité du vent dans ce cas va avoir une allure similaire à l'allure de l'intensité du vent pour les trois sections de même diamètre, alors que pour la partie conique il y a une compétition entre l'augmentation de l'intensité du vent avec la diminution du diamètre de la tour. Suite à la détermination des paramètres de l'équation (IV.1), on obtient la fonction donnant la distribution de la valeur de la charge du vent le long de la tour comme illustré sur la figure (IV.4).

\vec{U} : vitesse d'un élément de pale dû à la rotation des pales .

$$U = \omega R$$

\vec{V} : vitesse du vent.

\vec{W} : la vitesse relative.

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U}$$

Angle d'incidence (i) : l'angle formé par la corde et la vitesse relative W .

Angle de calage (α) : l'angle formé par la corde et le plan de rotation des pales.

Angle d'inclinaison (β) : l'angle formé par la vitesse relative W et le plan de rotation des pales [7].

La composante de la force aérodynamique par unité de longueur qui s'exerce perpendiculairement sur la corde est :

$$F_n = \frac{1}{2} \rho C_n l r W^2 \quad (\text{IV. 4})$$

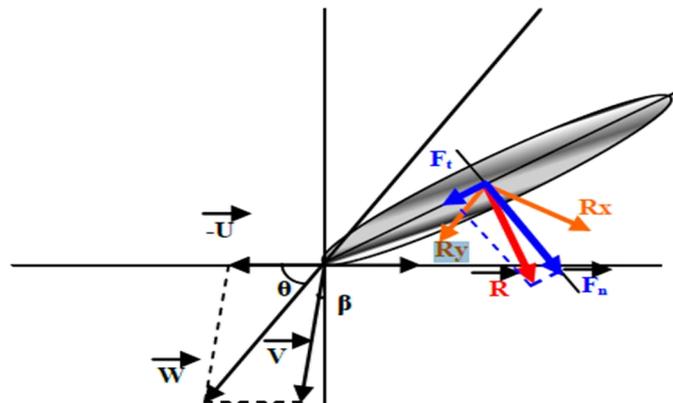


Figure IV.6: Présentation de la composante $F_n \perp$ à la corde .

Après le passage en revue des équations nécessaires pour le calcul des efforts dus au fonctionnement de pale, la partie suivante sera consacrée à la considération de cas pour le lesquels sera effectués les calculs nécessaires.

❖ **Les données :**

- **i:** Angle d'incidence = 8.5°
- Les valeurs des coefficients adimensionnels C_x et C_z dépendent de l'angle d'incidence (**i**) et sont déterminés expérimentalement en soufflerie.

$$C_z = 1.439 \quad , \quad C_x = 0.984$$

- **L :** Longueur de la pale $L = 45$ m
- **Largeur** $l = \frac{16\pi}{9C_z P} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}} = \frac{58.188}{\sqrt{36 \frac{r^2}{225} + 0.444}}$.

Pour faciliter les calculs d'intégrales on procède au développement limité qui permet de passer d'une expression fractionnelle avec radical à une équation polynomiale qui donne la longueur de la pale en fonction de r on obtient:

$$l = -0.312 r^3 + 0.942 r^2 - 0.996 r + 0.442$$

- $V = 10$ m/s
- $\omega = 0.733$ rad/s

- La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ_0 est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent.

$$\lambda_0 = 6$$

- $\rho_{\text{air}} = 1.25 \text{ kg/ m}^3$

Tel que, le coefficient aérodynamique de Lilienthal vaut :

$$C_n = (C_z \cos i + C_x \sin i)$$

$$C_n = (1.439 \cdot \cos 8.5^\circ + 0.984 \cdot \sin 8.5^\circ)$$

$$C_n = \mathbf{1.658}$$

Et la vitesse relative vaut :

$$W^2 = U^2 + V^2 + 2 U V \sin \beta$$

Dans le cas d'une marche normale, il est pris :

$$\beta = 0^\circ, V = 10 \text{ m/s et } U = 32.985 \text{ m/s}$$

Donc la vitesse relative vaut :

$$W = \sqrt{32.985^2 + 10^2} = 34,4675 \text{ m / s}$$

$$\mathbf{W = 34,4675m/s}$$

Ce qui donne alors l'effort normal:

$$F_n = 1/2 \cdot \rho \cdot C_n \cdot l \cdot r \cdot W^2 = 1.036 \cdot l \cdot r \cdot W^2$$

$$\mathbf{F_n = 1.036.l.r.W^2}$$

Pour déterminé $F_{n \max}$ on fait la discrétisation de notre pale en plusieurs sections comme présentée dans les tableaux ci-dessous.

r (m)	13,5	18	22,5	27	31,5	36	40,5	45
l (m)	4,963	3,842	3,122	2,625	2,263	1,988	1,772	1,598
W (m/s)	34,46	34,46	34,46	34,46	34,46	34,46	34,46	34,46
F_n (N)	82462	85115	86455	87231	87735	88084	88327	88505

Tableau IV.1. Valeurs de F_n le long de la pale 45 m

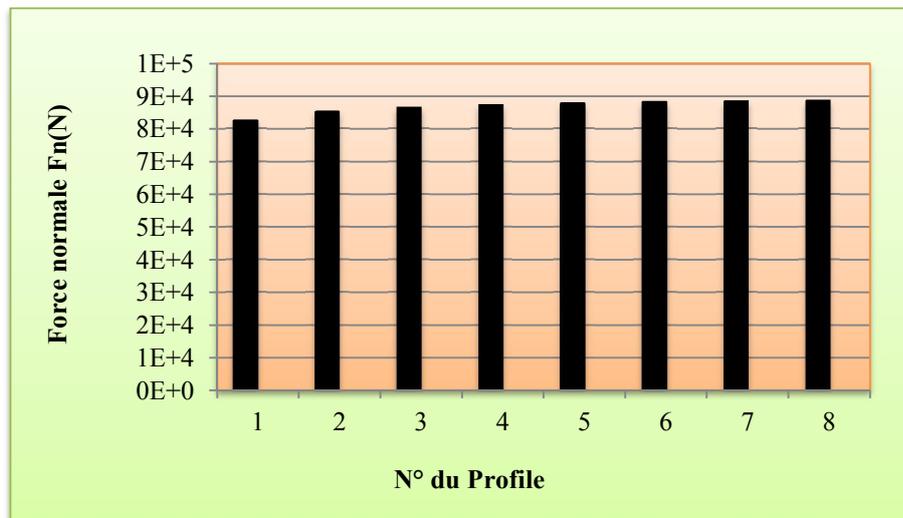


Figure IV.7 : Evolution des valeurs de F_n le long de pale à 45 m.

Les calculs nous ont permet d'obtenir la valeur maximale de F_n et qui vaut :

$$F_{n \max} \approx 88505 \text{ N.}$$

IV.3.4. Le couple moteur :

Parmi les sollicitations importantes s'exerçant sur la tour d'éolienne est le couple moteur généré par la rotation des pales qui entraînent la génératrice, ce couple est lié directement à :

P : la puissance de la génératrice (w) ,

ω : la vitesse de rotation (rad/s).

Sa valeur est obtenue à partir de la puissance de la génératrice et de la vitesse de rotation du rotor. On obtient pour le couple une valeur de :

$$C = \frac{P}{\omega} = \frac{1650}{0.733} = 2251 N.m$$

$$C = 2251 N.m$$

IV.4. Résultats et discussion :

Avant de lancer les calculs par l'utilisation du logiciel ANSYS d'éléments finis, il faut importer la tour conçue, ensuite on suit les étapes classiques qui sont : le choix d'élément, le maillage, les actions mécaniques et les conditions aux limites de la tour. L'élément choisi pour le calcul est un élément coque à huit nœuds, avec six degrés de liberté par nœud, il convient parfaitement aux calculs à cause du grand rapport diamètre/épaisseur le long de la tour, il assure une bonne stabilité vis-à-vis les flambements local. Cet élément est disponible dans la bibliothèque d'ANSYS sous le nom de **SHELL281**.

Les résultats obtenues suite aux calculs concernent : les déplacements ou la déflexion, les contraintes maximales, le rapport contrainte max/limite élastique, et enfin les réactions générées à la base de la tour et qui vont permettre de calculer les fondations nécessaire pour la fixation de la tour au sol.

Il faut rappeler que les calculs sont effectués pour un vent extrême conformément à la norme Algérienne [17]. En effet le règlement prévoit pour les zones les plus défavorable une vitesse maximale du vent atteignant les 31 m/s.

IV.4.1. Calcul des déplacements :

Le premier paramètre exploré concernant le comportement de la tour est son fléchissement sous une sollicitation extrême de fonctionnement. La figure (IV.8) donne la courbe de l'évolution de la valeur du déplacement le long de la tour. Il est trouvé que le déplacement total maximal est de 0.574 mètre qui est très proche du déplacement dans la direction de l'axe x.

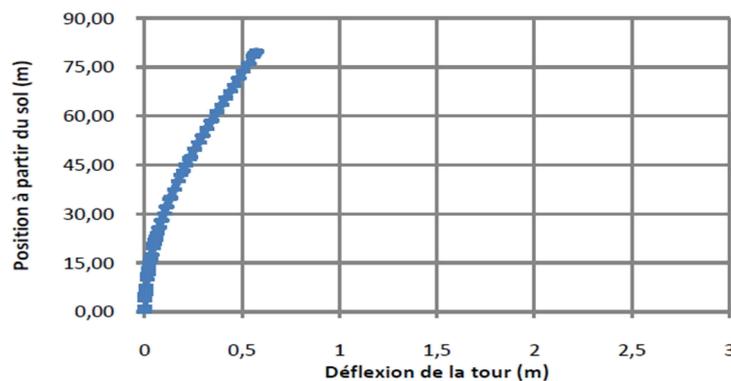


Fig IV.8 :Déflexion maximale le long de la tour.

IV.4.2. Calcul des contraintes de Von Mises:

Maintenant nous allons présenter les contraintes générées dans la tour. Nous allons utiliser la contrainte équivalente de Von Mises pour pouvoir juger des niveaux de sollicitation. La figure (IV.9) donne l'histogramme de l'évolution de la contrainte de Von Mises sur la ligne face au vent et qui passe

par la porte d'entrée à la tour. Dans la plus part des cas la contrainte ne dépasse pas les 70 MPa.

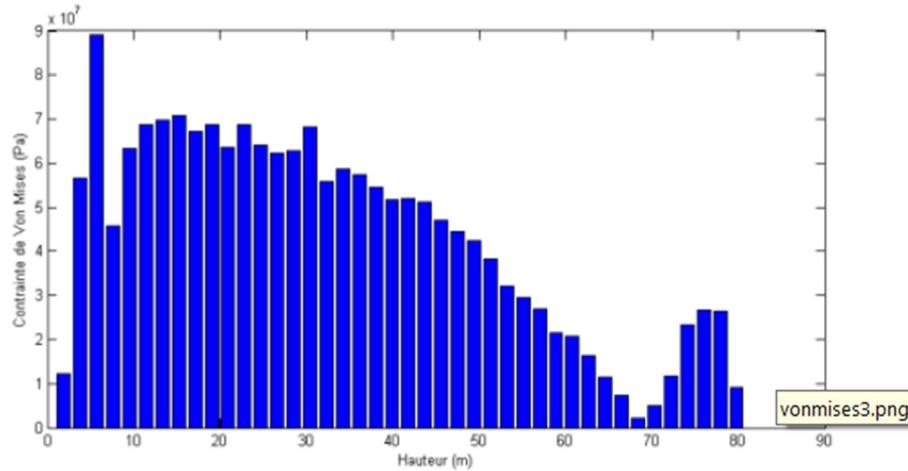


Fig IV.9. Contrainte de Von mises le long de la tour sur la ligne face au vent.

Par ailleurs, il est trouvé que la porte d'entrée à la tour présente une singularité qui génère une concentration de contrainte. Sur la figure (IV.10); il est illustré la distribution de la contrainte en échelle coloré sur toute la base de la tour incluant la porte d'entrée. Au milieu du cadre de la porte la contrainte a atteint une valeur exceptionnelle de près de 229 MPa. Cette valeur reste cependant inférieure à la contrainte ultime du matériau. Pour évaluer le niveau de la sollicitation, la figure (IV.11) donne en échelle colorée le rapport entre la contrainte équivalente de Von Mises et la contrainte ultime. Ce rapport est de 92% près de la porte ; alors qu'il est 30% un peu plus loin de la porte.

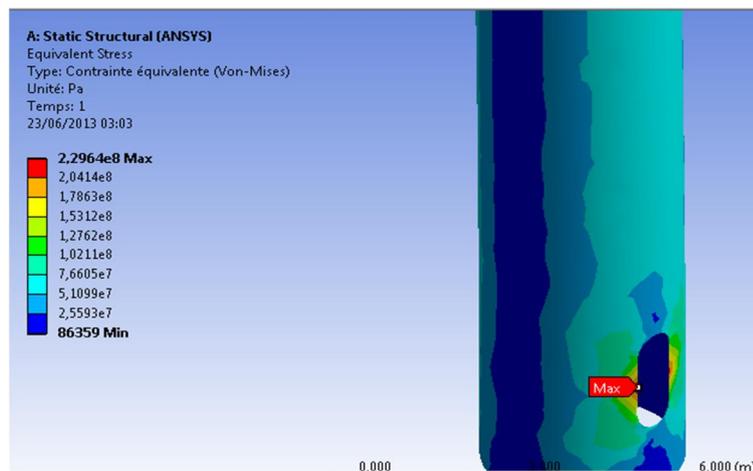


Figure IV.10 : Contrainte de Von mises en échelle colorée à la base de la tour.

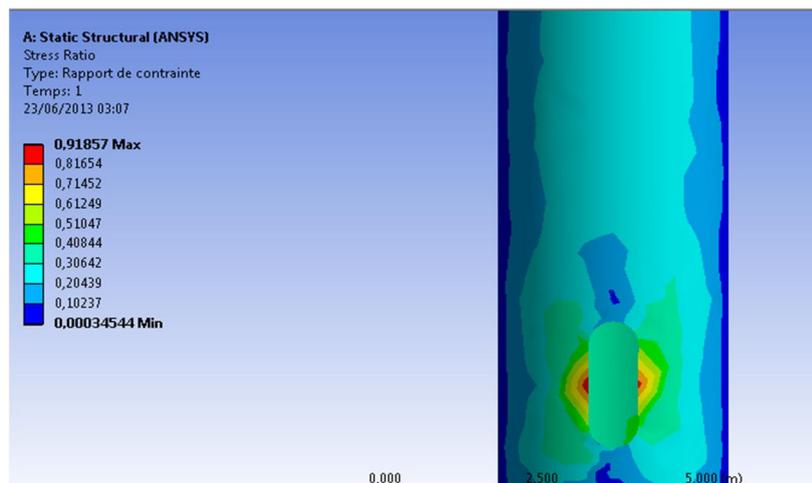


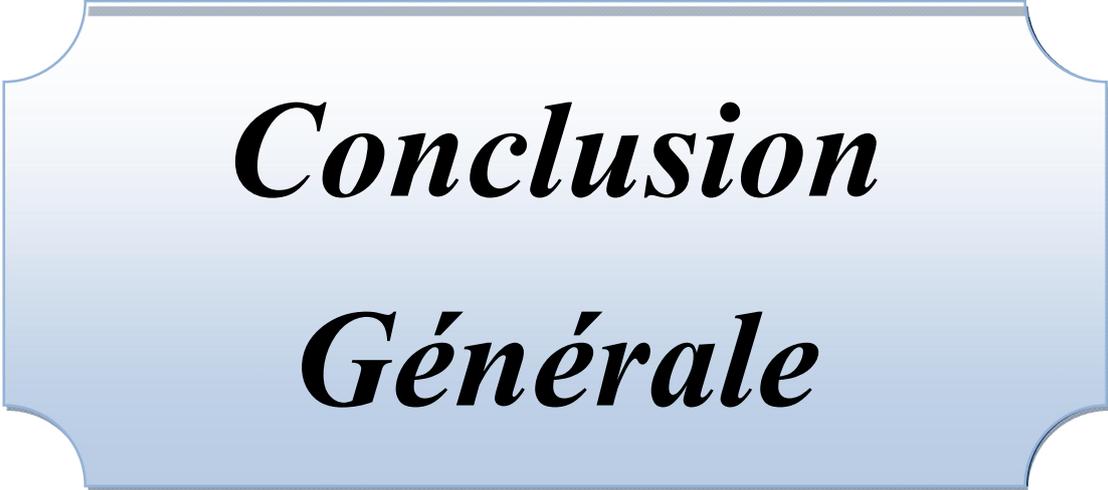
Figure IV.11 : le rapport de Contrainte en échelle colorée à la base de la tour.

IV.4.3. Réactions au niveau de la fondation :

La tour doit être fixée au sol par une certaine fondation. Cette fondation doit être en mesure de résister aux différents forces et moments générés par le fonctionnement de la tour. Pour cela nous avons déterminé les forces de réactions qui vont servir dans le dimensionnement de la fondation.

Axe	x	Y	z
F(tonnes)	31,8	235 ,1	0
M(KN.m)	-187,5	70,7	20935

Tableau IV.2 : Valeurs des réactions au niveau de la base de la tour.



Conclusion
Générale

Conclusion générale

La tour d'une éolienne permet le maintien de sa turbine à une certaine hauteur qui assure un fonctionnement optimal offrant un rendement élevé et une récupération maximale de puissance. Le coût de la tour représente près de 30% du coût global de l'investissement.

L'important élancement de la tour nécessite impérativement la vérification de sa résistance et de son intégrité structurale. L'effort de ce travail s'inscrit dans le cadre de la maîtrise des technologies des éoliennes. En considérant une tour d'une hauteur de 78 mètres pouvant supporter une turbine d'une puissance de 1.6 MW ; Il est présentée une démarche et est proposé des outils nécessaires pour la vérification de la résistance mécanique et du comportement de la tour, ceci a nécessité la modélisation, et l'évaluation des différents efforts supposés agir sur la structure. Ces efforts sont dus au fonctionnement de la turbine, et à l'effet direct du vent sur la tour et sur les pales. L'utilisation du calcul par éléments finis a permis de déterminer les contraintes de Von Mises maximales et les déflexions maximales dans le cas de sollicitations extrêmes de fonctionnement. Il est aussi identifié les endroits les plus sollicités de la tour qui se situent au niveau de la porte.

Référence :

- [1] ZERROUKI.F, and GANA.A, “Etude et analyse de la pertinence de l’implantation des éoliennes dans la région de tiziouzou,” département de génie mécanique, université de TiziOuzou, 2010.
- [2] DEBBACHE. M, “De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites” Département de génie mécanique, université de Biskra, 2012.
- [3] REDJEM. R, “ Étude d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne ”, Département d’Electrotechnique Université de Constantine 2009.
- [4] Agli. F, et maklid. T, "les paramètres aérodynamiques dans la conception de forme optimale ", Université Biskra, 2010.
- [5] Poitiers. F, “etude et commande de generatrices asynchrones pour l'utilisation de l'energie eolienne ”, Département d’électronique et génie électrique Université de Nantes 2003.
- [6] BELAID. A and SAHRAOUI. B, "Etude technologique d'une éolienne à axe horizontal et l'utilisation de la CAO dans sa conception ", Université Biskra, 2010.
- [7] HARARA. Z. E, “Proposition d’une conception et calcul d’un mat d’éolienne ”, Département de génie mécanique Université Biskra 2012.
- [8] REDJAIMIA. M. H, and TRIR. B, “Proposition de solutions technologiques et conception pour l’assemblage d’une petite éolienne à axe horizontal,” Département de génie mécanique, Université de Biskra, 2011.
- [9] G. D. H. N. Bazeos, I.D. Hondros, H. Karamaneas, D.L. Karabalis, and D. E. B. , “Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower,” Engineering Structures vol. 24, pp. 1015–1025, 2002.
- [10] G. N. I. Lavassas, P. Zervas, E. Efthimiou, I.N. Doudoumis,, and C. C. Baniotopoulos, “Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower,” Engineering Structures no. 25 pp. 1097–1106, February 2003.
- [11] P. E. Uys, J. Farkas, K. J’armai et al., “Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure,” Engineering Structures no. 29 pp. 1337–1342, 2007.
- [12] S. Cicero, and R. L. , R. Cicero, “Estimation of the maximum allowable lack of penetration defects in circumferential butt welds of structural tubular towers,” Engineering Structures, vol. 2009, no. 31 pp. 2123–2131, 2009.
- [13] J.-S. Chou, and W.-T. Tu, “Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower,” Engineering Failure Analysis, vol. 2011, no. 18, pp. 295–313, 2009.
- [14] A. Quilligan, A. O. C. , and V. P. , “Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers,” Engineering Structures, vol. 2012, no. 36 pp. 270–282, 2012.
- [15] CSA, "Design of Steel Structures," CAN/CSA-S16-09, Canadian Standards Association (CSA), Canada, 2009.

- [16] E. Nuta, "seismic analysis of steel wind turbine towers in the canadian environment," Department of Civil Engineering University of Toronto 2010.
- [17] CNERIB, "Règlement Neige et Vent 1999," éd: Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment, 2000.
- [18] P. R. Smith et T. J. Van Laan, Piping and pipe support systems : design and engineering. New York: McGraw-Hill, 1987.

Annexe : charge du vent dans chaque section de la structure

Z (mm)	D (mm)	Pd	V (m/s)	Re	Cd	U (N/m ²)
0	3650	303,75	22,5	5475000	0,08	88,695
1101	3650	303,75	22,5	5475000	0,08	88,695
4081	3650	391,6666726	25,54892703	6216905,577	0,08	114,3666684
7049	3650	466,1217643	27,87173778	6782122,86	0,08	136,1075552
10016	3650	517,3971537	29,3647545	7145423,595	0,08	151,0799689
12496	3650	551,0597761	30,30495981	7374206,887	0,08	160,9094546
14976	3650	579,39703	31,0743812	7561432,759	0,08	169,1839328
17456	3650	603,93714	31,72562786	7719902,78	0,08	176,3496449
19936	3650	625,6236009	32,29021365	7857285,321	0,08	182,6820915
22416	3650	645,0818683	32,788517	7978539,136	0,08	188,3639055
25001	3650	663,4624967	33,25236554	8091408,949	0,08	193,731049
27481	3650	679,5995652	33,65432643	8189219,432	0,08	198,443073
29961	3650	694,5108883	34,02153357	8278573,168	0,08	202,7971794
32496	3650	708,6755833	34,36672056	8362568,67	0,08	206,9332703
35076	3650	722,1301342	34,69142112	8441579,139	0,08	210,8619992
32496	3650	708,6755833	34,36672056	8362568,67	0,08	206,9332703
35076	3650	722,1301342	34,69142112	8441579,139	0,084	210,8619992
37556	3650	734,2681701	34,98176419	8512229,286	0,085	214,4063057
40036	3650	745,7214094	35,25353425	8578360,001	0,085	217,7506515
42516	3650	756,566874	35,50896531	8640514,893	0,086	220,9175272
44996	3650	766,8690639	35,74991108	8699145,029	0,086	223,9257667
47476	3650	776,6825551	35,97792665	8754628,818	0,087	226,7913061
49956	3650	786,053953	36,19432942	8807286,825	0,088	229,5277543
52436	3650	795,0233857	36,40024515	8857392,986	0,088	232,1468286
54896	3650	803,5576738	36,59509536	8904806,537	0,089	234,6388407
57255	3543	811,4297938	36,77391193	8685997,999	0,086	229,9916608
59535	3436	818,770254	36,93987188	8461693,32	0,084	225,0635674
61821	3328	825,8843915	37,10000652	8231254,78	0,08	219,8834604
64114	3220	832,7900455	37,25478997	7997361,581	0,08	214,5267157
66413	3112	839,4974994	37,40451778	7760190,622	0,08	209,0012975
68718	3004	846,0189366	37,54952078	7519917,361	0,08	203,3152709
71029	2895	852,3654302	37,69009833	7274188,977	0,08	197,4078336
73347	2786	858,5497059	37,82658011	7025656,812	0,08	191,3535584
74789	2718	862,3099011	37,90932426	6869169,555	0,08	187,5006649
76230	2650	866,0037248	37,99043241	6711643,058	0,08	183,5927897
78230	2282	871,0290174	38,10049941	5796355,978	0,08	159,0150574

Résumé :

La présente étude s'intéresse à une partie importante de l'éolienne qui est la tour ou appelé aussi le mat. La tour permet de placer le rotor de l'éolienne à une certaine hauteur garantissant une vitesse de vent plus forte et plus régulière. L'intérêt de cette partie est justifié, dans l'objectif de minimiser le cout de la tour qui à elle seule représente près de 30% du cout total de l'éolienne. Notre contribution à travers ce travail consiste à exposer la démarche concernant le calcul d'une telle structure qui présente plusieurs particularités, on passe tout à bord par une phase de modélisation et de calcul des différentes sollicitations de fonctionnement de la tour ainsi que de sa géométrie, ensuite vient le calcul nécessaire pour la vérification de la résistance à des sollicitations extrêmes de fonctionnement. L'outil de calcul étant les éléments finis. La tour étudiée est de forme tubulaire en acier d'une hauteur de 78 mètres qui peut porter une turbine de 1.6 MW de puissance. Les résultats illustrent le comportement de la tour, identifient les endroits les plus sollicités et vérifient la résistance de la structure selon les normes en vigueur.

Mots clés : Eolienne, Tour, Eléments finis, Normes, structure.

Abstract:

This study focuses to the essential part of the wind turbine which is the tower . The tower can be hold the wind turbine rotor at the certain height to must have highest wind speed and regular. The interest of this study is justified in order to minimize the cost it only represents about 30% of the total cost of the wind turbine. Our contribution through this work is to present the approach for the calculation of such a structure has several features, we lock firste through a phase of modeling and calculation of the various demands for operation of the tower and its geometry, then comes the computation required for verification of resistance to extreme loads operation. The calculation tool is the finite elements. Studied tower is a tower of tubular form made about steel having a height of 78 meters which may be hold 1.6 MW turbine power. The results illustrate the behavior of the tower, identify the section most attract and check the resistance of the structure according to the standards places.

Keywords : wind turbine, tower, finite elements, standards, structure.

ملخص :

تهتم هذه الدراسة بالجزء المفصلي في التوربينات الهوائية المتمثل في البرج. هذا العنصر يسمح بوضع الدوار فوقه على ارتفاع مناسب يضمن سرعات رياح عالية ومنتظمة، الهدف من هذا الجزء مغل وهو تقليل من تكلفة البرج لأنها تمثل 30% من التكلفة الإجمالية لتوربينات. مساهمتنا من خلال هذا العمل هو تقديم الحسابات الهيكلية للبرج بالمرور عبر مرحلة التمثيل، ثم التحقق من مقاومته اثناء تشغيل الأحمال القصوى. أداة الحساب هو العناصر المنتهية. البرج المدروس ذو الشكل الأنبوبي من الصلب ارتفاعه 78 مترا والقادر على حمل توربين لتوليد 1.6 ميغاواط طاقة. اظهرت سلوك البرج، كما ساعدت على معرفة المناطق المعرضة لقوة الرياح، وتحقق من مقاومة الهيكل وفقا لمعايير المعمول بها.

كلمات مفتاحية : توربينات الرياح، برج، العناصر المنتهية، المعايير، هيكل.