

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Faculté des Sciences
et Technologie



كلية علوم والتكنولوجيا

Département des Sciences
et Technologie

قسم العلوم والتكنولوجيا

Université de Ghardaïa

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de
Master académique en Sciences et Technologie
Spécialité : Energies renouvelables

THEME

Contribution à l'Etude Et Conception D'une Eolienne

Présenté par

Benichou Sarah

Membres du jury

Grade

Adamou Youcef

MA 'A' (UNV-Ghardaia)

Président

Bennouna Mohmed Salah

MA 'A' (UNV-Ghardaia)

Encadreur

Damba Nadhir

MA 'A' (UNV-Adrar)

Co-encadreur

Akermi Fouzi

MA 'A' (UNV-Ghardaia)

Examineur

Arif Mohammed

MA 'A' (UNV-Ghardaia)

Examineur

Sept 2017

REMERCIEMENTS

- Avant tout nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la volonté, la santé et la patience durant nos années d'études et surtout pendant la réalisation de ce mémoire.
- Mes remerciements s'adressent :
- Au Mr. **Bannouna M.S**, mon encadreur, et Mr. **Damba N** d'avoir accepté de diriger cette recherche et de m'avoir accompagné avec des encouragements optimistes dans un domaine vaste et difficile mais à la fois passionné et passionnant.
- A monsieur, **Adamou Youcef** enseignant à Université de Ghardaïa, d'avoir accepté à être Président du jury.
- Au Membre du Jury :, **Arif Mohammed** enseignant à Université de Ghardaïa, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail.
- Au Membre du Jury : **Mr. Akermi Fouzi** enseignant à Université de Ghardaïa, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail.
- Enfin, je remercie tous les membres de ma famille pour tous ce qu'ils ont endurés avec moi pendant cette période, je dédie cette thèse à mes parents et à mon chère marié **HAKIM**
- A tous les enseignants intervenants au Master « énergies renouvelables ».
- A tous mes Amis.
- A toute personne qui m'a aidé dans la réalisation de ce travail.
- A **toi** aussi Cher Lecteur, qui anonymement est en train de lire ce travail, et qui j'espère te sera d'une quelconque aide, et me permettra ainsi d'espérer à une satisfaction d'avoir transmis ce qui devait se transmettre.
- Je ne saurais terminer mes remerciements sans citer les étudiants de la promotion de « Energies Renouvelables » pour les moments qu'on a partagé.
- Enfin, à mes proches pour leur soutien inconditionnel et à ma famille, pour m'avoir accompagné et soutenu pendant toutes ces années.

RESUME

La quasi-totalité des études effectuées dans les laboratoires ou sur sites réels dans le domaine de la conception et la conversion éolienne à axe horizontale vise principalement l'optimisation des éoliennes du point de vue : aérodynamique, vibratoire et économique.

La connaissance des charges indésirables et des contraintes mécaniques associées dans les supports des pales est cruciale pour décrire, comprendre et optimiser la conception des rotors éoliens au niveau des performances souhaitées. La modélisation mécanique des éoliennes est souvent effectuée en considérant soit des sollicitations aérodynamiques (portance et trainée) soit des forces dynamiques de rotation (centrifuges). Seulement, le mouvement combiné du rotor et de la nacelle induit des efforts inertiels importants indésirables sur la structure de l'éolienne à tenir en compte Durant la phase de conception. Ainsi, la présente approche a permis de modéliser les sollicitations dynamiques sur le rotor et montrer que l'augmentation de la vitesse de la nacelle de (0 à 25)% de la vitesse du rotor entraîne une augmentation de la contrainte équivalente de plus de 40% induisant une diminution du facteur de sécurité du matériau de 17%(de 4.2 à 3.5) accompagnée d'une perte de matière engendrée par l'augmentation compensatoire de la section du support et des pales de (17.2 à 18)% selon la géométrie utilisée.

Mots clés : Rotor éolien, modélisation dynamique, contrainte équivalente, section admissible du support, facteur de sécurité.

ABSTRACT

The quasi-totalité all of the studies carried out in laboratories or on real sites in the field of horizontal wind axis design and conversion are mainly aimed at the optimization of wind turbines in terms of aerodynamics, vibration and economics.

Knowledge of the undesirable loads and the associated mechanical stresses in the blade supports is crucial to describe, understand and optimize the design of the wind turbines to the desired performance levels. The mechanical modeling of wind turbines is often carried out by considering either aerodynamic stresses (lift and drag) or dynamic forces of rotation (centrifuges). However, the combined movement of the rotor and the nacelle induces significant undesirable inertial forces on the structure of the wind turbine to be taken into account during the design phase. Thus, the present approach made it possible to

model the dynamic stresses on the rotor and to show that the increase in the speed of the nacelle from (0 to 25)% of the rotor speed leads to an increase in the equivalent stress of more than 40 % inducing a decrease in the material safety factor of 17% (from 4.2 to 3.5) accompanied by a loss of material caused by the compensatory increase in the section of the support and the blades of (17.2 to 18)% according to the geometry used.

Key words: Wind rotor, dynamic modeling, equivalent stress, permissible cross section of the support, factor of security.

Table des matières

INTRODUCTION	2
1.1. Historique de l'énergie éolienne	5
1.2. Les énergies renouvelables	5
1.3. principales sources d'énergies renouvelables	6
L'énergie solaire	6
L'énergie éolienne	6
La biomasse	7
L'énergie hydraulique :	8
L'énergie géothermique :	8
L'énergie des mers ou énergie marine	9
1.4. Les énergies et leur avenir	9
1.5. Utilisations du vent	10
Figure I.8: Schéma des circulations atmosphériques terrestres	12
1.5.2. Mousson	12
1.5.3. Origine du vent	13
1.5.3.1. Cas général	13
1.5.3.2. Cas particuliers	14
1.5.4. Effets des montagnes	14
Figure I.10 : Effets des montagnes	14
1.5.5. Effets de la végétation et de la rugosité du paysage	15
Figure I.11 : Régime de brise	16
1.5.7. Effets des vallées (goulets)	17
1.5.8. Effets de méso-échelle	17
1.6. Description de la variation du vent : La distribution de Weibull	18
Modèle général des variations de la vitesse du vent	18
1.7. Technologie des grands aérogénérateurs	19
Evolution de la technologie et de l'offre commerciale	19
1.8. Caractéristiques aérodynamiques des turbines, intérêt de la vitesse variable	20
1.9. Cinétique du vent – conversion énergie mécanique.	21
1.10. Énergie cinétique du vent – conversion énergie mécanique	22
Loi de betz	22
1.11. Qu'est-ce que l'énergie éolienne ?	24
1.12. Classification des éoliennes	25
1.12.1 Eoliennes à axe horizontal	25
1.12.2. Eoliennes à axe horizontal Amont	26
1.12.3. Eoliennes à axe horizontal Aval	27
1.13. Les différents types d'éoliennes	29

2.1. Descriptif d'une éolienne	32
2.2. Fonctionnement	33
2.2 Principaux composants	35
2-3 principaux composants de l'éolienne moderne	38
2.4. Structure générale de la transmission de puissance d'une éolienne	39
2.5. L'importance du générateur électrique	40
2.7. Pourquoi la plupart des éoliennes sont-elles trois pales ?	42
2.8. Configuration des pales	42
2.9. Cut-in Speed/Cut out speed	43
2.10. Intégration de l'énergie éolienne dans le système électrique	44
2.11. Etude préliminaire de mécanique des fluides	45
2.12. Interaction Pale/Vent	48
2.12.1. Terminologie	48
2.12.3. Théorie des ailes	49
2.12.4. Vitesse Induite	53
2.12.5. Effet d'extrémité et déflexion de l'écoulement	54
2.13. Zones de fonctionnement de l'éolienne :	57
2.14. Eolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable	58
3.1. Introduction	61
3.2. Théories aérodynamiques	62
3.2.1 Théorie de l'écoulement axial (the axial momentum theory)	62
3.1.2 Théorie de l'élément de pale	65
Remarque	71
3.2 Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale	72
3.2.1 Calcul de la forme optimale de la pale	75
4.1. Géométrie des pales	78
4.2 Méthode des éléments finis	80
4.3 Analyses statique de la pale	81
4.3.1. type de sollicitation	81
4.3.2. Les forces appliquées	82
4.3.3. Détermination des forces subit par un élément de pale	83
4.4. Utilisation de l'outil d'Abaqus	83

4.5. Spécification du problème	84
4.6. Conditions aux limites	84
4.7. Analyse structurelle statique	85
4.8. Le maillage de la pale :	85
4.9. solutions de Cas de marche normale	85
4.9.1. Contraintes	86
4.9.2. Les déformations	86
4.9.3. Déplacement	87
4.10. Cas de Vent Extrême	89
4.10.1. Contrainte	89
4.10.2. Déformation	90
4.10.3. Déplacement	91
Conclusion	92

INTRODUCTION

INTRODUCTION

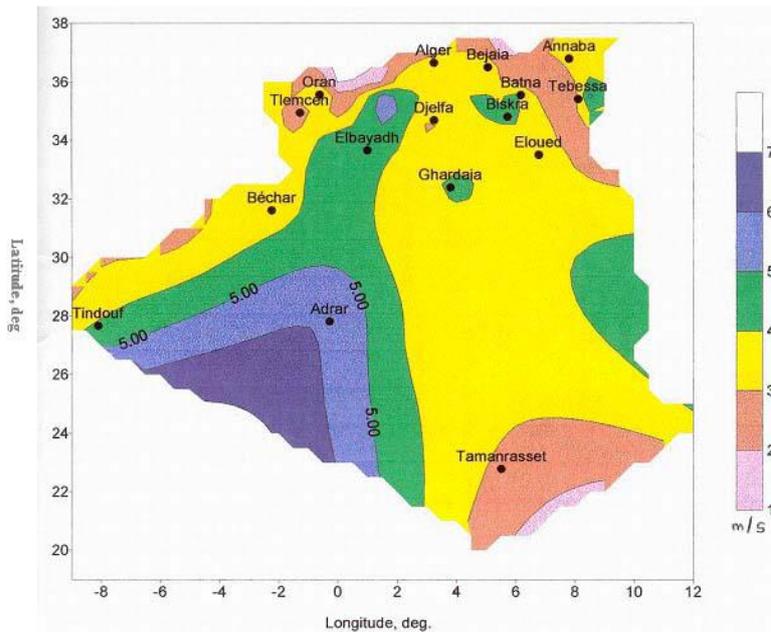
La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la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

Actuellement l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse sont les sources d'énergies renouvelables connues de nos jours. Parmi celles-ci l'énergie éolienne générée par les vents issus de turbulences causées par le réchauffement (inégal) de l'atmosphère par la chaleur solaire. Aujourd'hui la plupart des éoliens sont des grands systèmes industriels de production d'énergie, ils constituent des parcs connectés en réseau qui produisent directement de l'électricité à partir du vent. Par contre il y a des petits systèmes de production bien qu'ils ont une rentabilité nettement plus faible que l'éolien industriel mais elles représentent l'un des secteurs les plus dynamiques. Les éoliennes ne sont pas réservées aux industries, il existe des éoliennes pour particuliers que chacun peut les installer sur son toit, dans son jardin, ...etc., on les appelle éolienne personnelle ou encore éolienne domestique. Même si elle reste sous le feu des critiques (défiguration du paysage, coût...etc.). Les petites éoliennes individuelles (domestiques), sont très utilisées pour alimenter en énergie électrique des sites isolés dont les besoins énergétiques sont réduits, exploitants dans le domaine d'agricole pour pomper de l'eau à moindre coûts et d'une façon plus silencieuse qu'avec un moteur thermique. L'objectif principal d'implanter une petite éolienne sur un site isolé est de produire de l'électricité ou de l'énergie mécanique avec une simple conception qui n'est pas coûteuse. Les dernières générations des éoliennes personnelles sont beaucoup plus compactes que les anciennes éoliennes domestiques, plus petites et faciles à installer.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il aura vendu 72 exemplaires en 1908.

En raison de la nature fluctuante du vent, l'éolien ne peut être considéré que comme une source d'énergie de complément et non de remplacement des solutions classiques. Actuellement, plusieurs pays

sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne .L'Allemagne est aujourd'hui le premier producteur mondial avec une production de 14.6 GW en 2003, l'Espagne est au deuxième rang avec 6.4 GW, les USA au troisième rang avec 6.3 GW et le Danemark au quatrième rang avec 3.1 GW. La France est au dixième rang européen avec 0.253 GW. L'Union Européenne avec 4,15 GW.En Algérie, on a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s, voir carte des vents). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux.



Carte préliminaire des vents de l'Algérie.

Pour le site de Tamanrasset, le potentiel éolien étant très faible alors que le potentiel solaire semble plus satisfaisant. Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une source d'énergie prometteuse dans notre pays.

Chapitre 01: **les énergies renouvelables**

1.1. Historique de l'énergie éolienne

Depuis longtemps, les hommes ont compris l'intérêt de l'utilisation du vent. C'est ainsi que cette source d'énergie renouvelable a été utilisée à divers usages. La première utilisation connue remonte à l'Antiquité avec les galères, qui sont des bateaux à voile. Plus tard, vers l'an 600, on a commencé à utiliser des moulins à vent, qui produisent de l'énergie mécanique à partir du vent. Les moulins à vent sont les ancêtres des éoliennes. C'est-à-dire qu'au lieu de broyer des grains de blé, les éoliennes modernes servent à produire de l'énergie électrique. Les premières éoliennes étaient utilisées dans des endroits reculés et non-connectés à un réseau électrique. L'énergie ne pouvait pas être stockée, et par conséquent sans vent il n'y avait plus d'électricité. Mais le développement de maîtrises du stockage d'énergie par batteries a permis une utilisation plus étendue et plus performante des éoliennes. De plus, depuis les années 1990, des recherches ont rendu possible la création de puissants aérogénérateurs de plus de 1 MW.

Aujourd'hui les éoliennes sont utilisées dans plusieurs pays du monde et servent à produire du courant électrique alternatif, comme les centrales nucléaires, les barrages hydroélectriques ... Cependant, les éoliennes produisent seulement 1% de la production de l'électricité dans le monde.

Les éoliennes se développent particulièrement dans les pays occidentaux même si des pays asiatiques comme la Chine ou l'Inde commencent à suivre le mouvement.

1.2. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont créées à partir de sources d'énergies naturelles et écologiques comme le soleil, le vent, l'eau, la marée ou les matières organiques.

Ces énergies sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants qui les rendent inépuisables. Elles sont également parfois appelées énergies "vertes" ou "propres" car elles émettent moins de CO₂ que les énergies issues de sources fossiles. Aujourd'hui les différents gouvernements cherchent à accroître la part d'énergie d'origine renouvelable sur le marché de l'énergie afin de lutter pour la sauvegarde de l'environnement.

L'Algérie s'engage sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre à moyen terme une part appréciable de la production nationale d'électricité.

Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergies renouvelables.

1.3. Principales sources d'énergies renouvelables

L'énergie solaire

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique (voir photo à droite), des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires (voir photo à gauche). Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire.



Figure 1.1 :panneaux solaires

L'énergie éolienne

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et des machines qui le transforment en énergie électrique.

Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.



Figure I.2 : L'énergie éolienne

La biomasse

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes ! La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie¹), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.



Figure I.3: La biomasse

L'énergie hydraulique :

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.



Figure I.4 : L'énergie hydraulique

L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer être refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie

géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur, par exemple.

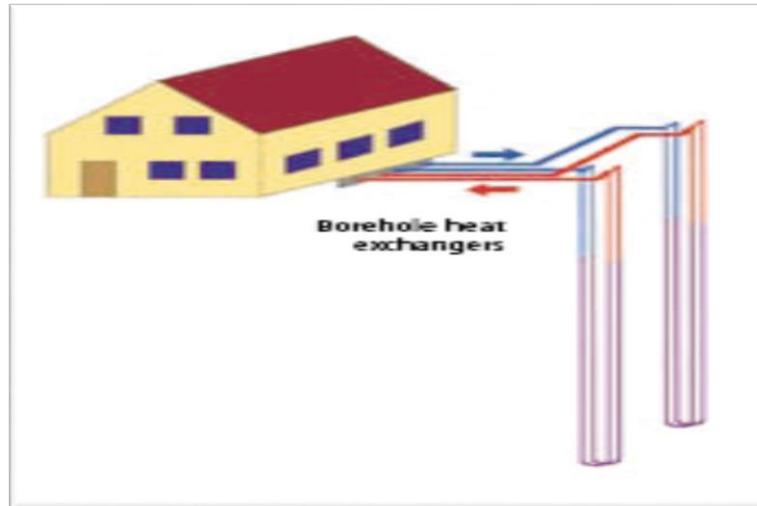


Figure I.5: L'énergie géothermique

L'énergie des mers ou énergie marine

C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, qui couvrent presque 70 % de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable.

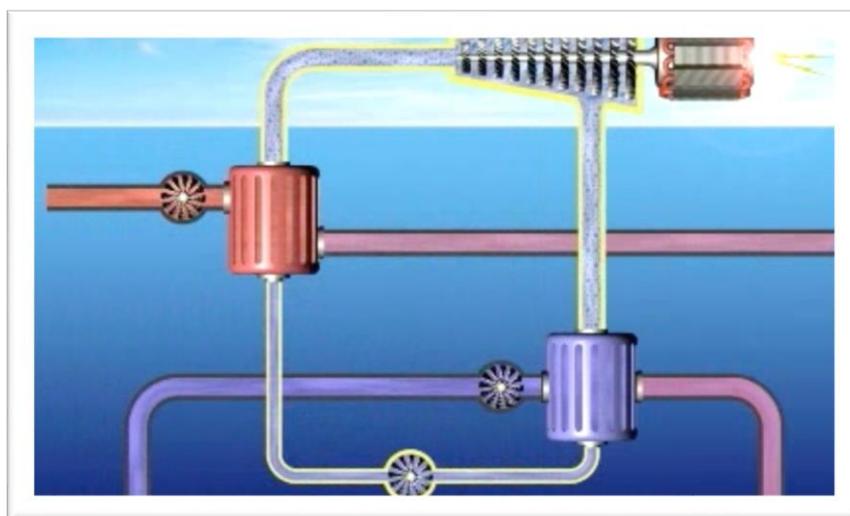


Figure I.6: L'énergie marine

1.4. Les énergies et leur avenir

Sous le double effet de la croissance économique et de la hausse de la population mondiale, la demande mondiale en énergie devrait croître de 52 % à l'horizon 2030 selon les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie, voire de 71 % selon les estimations du Département américain de l'énergie.

Si les énergies renouvelables et le nucléaire sont appelés à se développer, les énergies primaires traditionnelles (charbon, pétrole et gaz naturel) produiront toujours, dans 25 ans, la majorité de l'énergie mondiale. Dans cet article, nous faisons le point sur l'état des ressources des énergies primaires, traditionnelles et renouvelables, et sur le potentiel de développement de ces dernières.

Principales sources et utilisations au monde

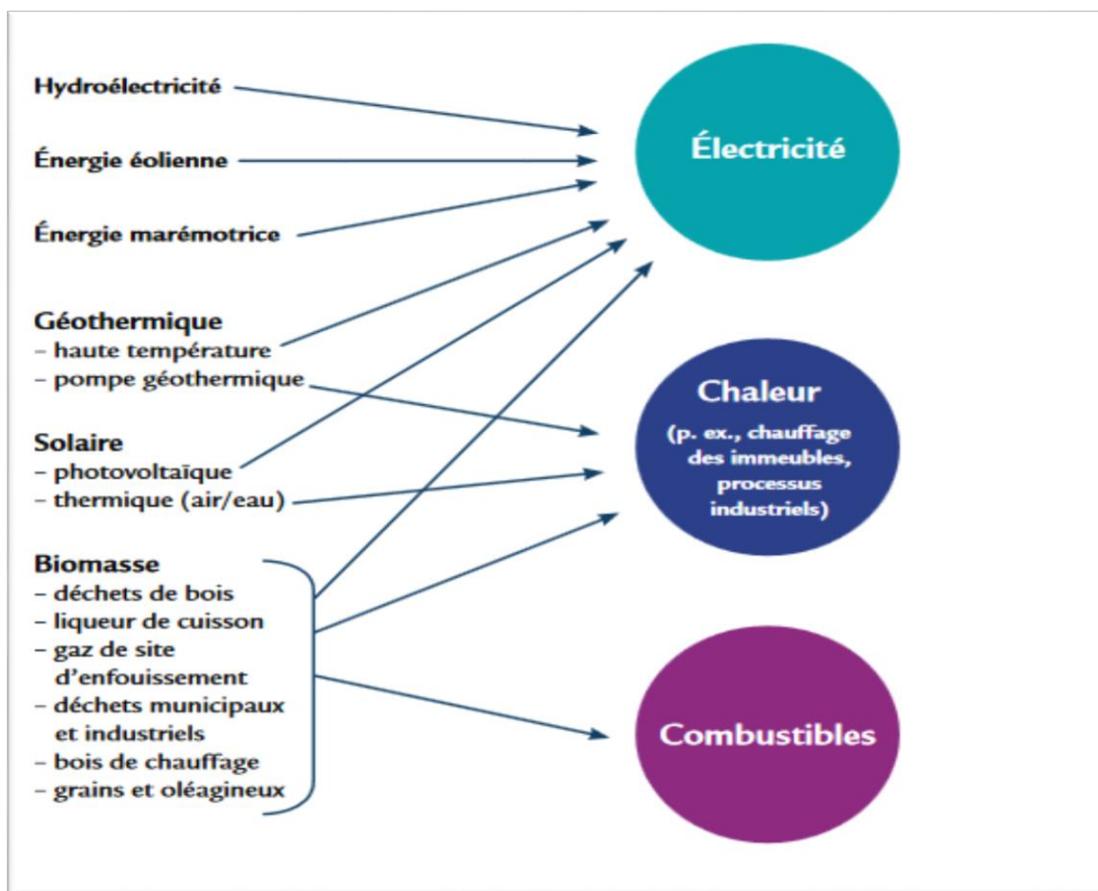


Figure 1.8: Principales sources de l'énergie

1.5. Utilisations du vent



Figure I.7 : Utilisations du vent

Les vents sont une source d'énergie renouvelable, et ont été utilisés par l'Homme à travers les siècles à divers usages, comme les moulins à vent, la navigation à voile, le vol à voile ou plus simplement le séchage. Différents sports utilisent le vent dont le char à voile, le cerf-volant, la planche à voile et le kitesurf. Il sert également à aérer, assainir, rafraîchir les milieux urbains et les bâtiments. Le vent est une de nos plus anciennes sources d'énergie et une grande partie de toutes nos productions tire parti du vent ou lui est adapté. Aujourd'hui encore, il est un intense sujet de recherche car son potentiel d'utilisation demeure encore largement inutilisé tant via des éoliennes que des systèmes de pompe à chaleur ou pour assainir l'air urbain par une urbanisation raisonnée des villes en tenant compte du vent.

1.5.1. Schéma des circulations atmosphériques terrestres

On distingue trois zones de circulation des vents entre l'équateur et les pôles. La première zone est celle de Hadley qui se situe entre l'équateur et 30 degrés Nord et Sud où l'on retrouve des vents réguliers soufflant du nord-est dans l'hémisphère nord et du sud-est dans celui du sud : les alizés. Les navigateurs à voile ont depuis longtemps utilisé cette zone de vents réguliers pour traverser les océans. La seconde se situe aux latitudes moyennes et est caractérisée par des systèmes dépressionnaires transitoires où les vents sont surtout d'ouest, c'est la cellule de Ferrel. Finalement, la cellule polaire se retrouve au nord et au sud du 60e parallèle avec une circulation de surface généralement d'est. Entre ces trois zones, on retrouve les courants-jets, des corridors de vents circulant autour de la planète à une altitude variant entre 10 et 15 km et qui sont le lieu de frontogénèses. Ces traits généraux de la circulation atmosphérique se subdivisent en sous-secteurs selon le relief, la proportion mer/terre et d'autres effets locaux. Certains donnent des vents ou des effets sur de grandes étendues alors que d'autres sont très locaux.

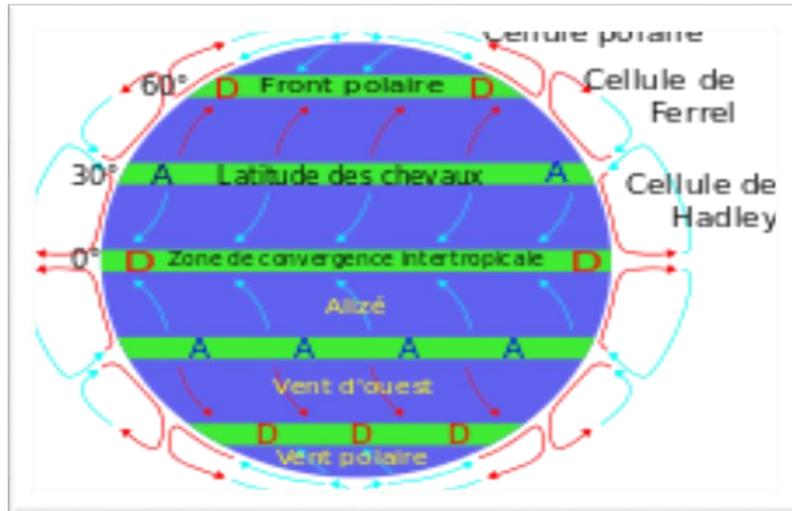


Figure I.8: Schéma des circulations atmosphériques terrestres

1.5.2. Mousson

La mousson est le nom d'un système de vents périodiques des régions tropicales, actif particulièrement dans l'océan Indien et l'Asie du Sud. Il est appliqué aux inversions saisonnières de direction du vent le long des rivages de l'océan Indien, particulièrement dans la mer d'Arabie et le golfe du Bengale, qui souffle du sud-ouest pendant six mois et du nord-est pendant l'autre semestre. La mousson est un exemple extrême des brises de terre et brises de mer car elle ne s'inverse pas sur un mode nocturne/diurne.



Figure I.9: Mousson

1.5.3. Origine du vent

Les causes principales des grands flux de circulation atmosphérique sont : la différence de température entre l'équateur et les pôles, qui provoquent une différence de pression, et la rotation de la Terre qui dévie le flot d'air qui s'établit entre ces régions. Des différences locales de pression et de températures vont quant à elle donner des circulations particulières comme les brises de mer ou les tornades sous les orages.

1.5.3.1. Cas général

Diagramme qui montre comment les vents sont déviés pour donner une circulation anti-horaire dans l'hémisphère Nord autour d'une dépression. La force de gradient de pression est en bleu, celle de Coriolis en rouge et le déplacement en noir.

La pression atmosphérique en un point est la résultante surfacique du poids de la colonne d'air au-dessus de ce point. Les différences de pression qu'on note sur le globe terrestre sont dues à un réchauffement différentiel entre ces points. En effet, l'angle d'incidence du rayonnement solaire varie de l'équateur aux pôles. Dans le premier cas, il est normal à la surface de la Terre alors que dans le second, il est rasant. Cette variation conditionne le pourcentage d'énergie solaire reçue en chaque point de la surface terrestre. De plus, les nuages reflètent une partie de cette énergie vers l'espace et elle est absorbée différemment selon le type de surface (mer, forêt, neige, etc.).

La différence de pression ainsi créée induit un déplacement d'air des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Si la Terre ne tournait pas sur son axe, la circulation serait rectiligne entre les régions de haute et les régions de basse pression. Cependant, la rotation de la Terre entraîne une déviation

de la circulations sous l'effet de la force de Coriolis, cette déviation étant vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud. L'air subit ainsi une somme vectorielle des deux forces (force de Coriolis et résultante des forces de pression).

À mesure que les parcelles d'air changent de direction, la force de Coriolis change également de direction. Lorsque les deux sont presque égales et de directions opposées, la direction du déplacement de l'air se stabilise pour être presque perpendiculaire au gradient de pression. La petite différence qui subsiste laisse une accélération vers la plus basse pression, la direction du vent reste donc orientée un peu plus vers les basses pressions ce qui fait que le vent tourne autour des systèmes météorologiques.

Aux forces de pression et de Coriolis, il faut ajouter le frottement près du sol, la force centrifuge de courbure du flux et la tendance isallobarique, pour correctement évaluer le vent dans le cas général.

À grande échelle dans l'hémisphère nord, les vents tournent donc dans le sens horaire autour d'un anticyclone, et anti-horaire autour des dépressions. L'inverse est vrai pour l'hémisphère sud où la force de Coriolis est inverse. On peut déterminer notre position entre ces deux types de systèmes selon la loi de Buys-Ballot : un observateur situé dans l'hémisphère nord qui se place dos au vent a la dépression à sa gauche et l'anticyclone à sa droite. La position des zones de pressions est inversée dans l'hémisphère sud.

1.5.3.2. Cas particuliers

Vents locaux à travers le Monde. Ces vents sont généralement créés par des échauffements de terrain ou des effets montagneux.

La force de Coriolis s'exerce sur de longues distances ; elle est nulle à l'équateur et maximale aux pôles. Dans certaines situations, le déplacement d'air ne s'exerce pas sur une distance suffisante pour que cette force ait une influence notable. Le vent est alors causé seulement par le différentiel de pression, le frottement et la force centrifuge. Voici quelques cas qui se produisent lorsque la circulation générale des vents est nulle, très faible ou quand on doit tenir compte d'effets locaux :

1.5.4. Effets des montagnes

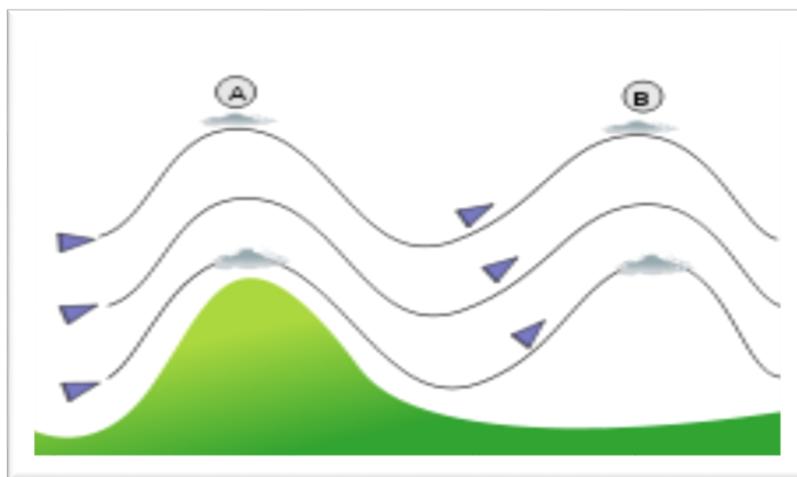


Figure I.10 : Effets des montagnes

Effet d'ondulation avec amortissement sur un vent à cause d'une montagne. La dépression de la masse d'air au sommet de la montagne (contexte plus froid) peut déclencher la nucléation des gouttes d'eau et la création d'un nuage de sommet.

Les montagnes ont différents effets sur les vents. Le premier est l'onde orographique lorsque le vent soufflant perpendiculairement à une barrière montagneuse doit remonter la pente. Si l'environnement est stable, la masse d'air redescendra du côté aval de l'obstacle et entrera en oscillation autour d'une hauteur qui peut être largement supérieure au sommet de celui-ci. Par contre, si l'air est instable, l'air continuera de s'élever, avec ou sans oscillation. Dans ces conditions, le frottement et la poussée d'Archimède doivent être pris en compte lors de la modélisation du vent, comme c'est le cas pour le foehn. Les pluies en sont modifiées.

L'air froid plus dense en haut d'une montagne y crée une pression plus forte que dans la vallée et provoque un autre effet. Le gradient de pression fait alors dévaler la pente à l'air sur une distance insuffisante pour que la force de Coriolis le dévie. Cela engendre donc un vent catabatique. On rencontre ce genre d'effet le plus souvent la nuit. Ils sont également très communs au front d'un glacier, par exemple, sur la côte du Groenland et de l'Antarctique à toute heure.

Le vent anabatique est un vent ascensionnel d'une masse d'air le long d'un relief géographique dû au réchauffement de celui-ci et donc l'opposé du vent précédent. Diverses conditions météorologiques peuvent créer un vent anabatique, mais il s'agit toujours de la formation d'une différence de température entre les masses d'air au-dessus des vallées et celles réchauffées sur leurs pentes qui cause une circulation d'air. Il est donc aussi appelé vent de pente et se produit le plus souvent le jour.

1.5.5. Effets de la végétation et de la rugosité du paysage

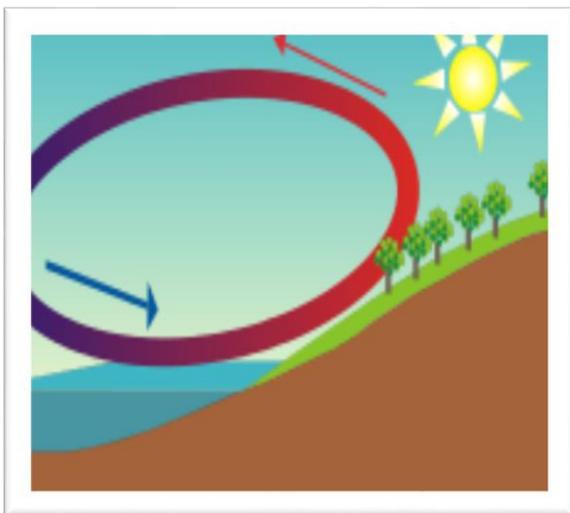
La rugosité du paysage et en particulier la rugosité "molle" (celle des forêts, bocages, savanes, par rapport aux roches et immeubles qui ne bougent pas) des arbres a un impact sur les vents et les turbulences, et indirectement sur les envols ou dépôts de poussières, la température, l'évaporation, le mélange de la partie basse de la colonne d'air (de la hauteur des pots d'échappement à la hauteur où sont émis les panaches de cheminées d'usine ou de chaudières urbaines par exemple), la régularité du vent (important pour les installations d'éoliennes ou de fermes éoliennes), etc. À cet effet, Kalnay et Cai dans la revue Nature, avaient en 2003 posé l'hypothèse que les arbres freinaient significativement le vent. En forêt tropicale dense, hormis lors des tempêtes, au sol on ne sent presque plus les effets du vent. La plupart des arbres n'y produisent leurs puissants contreforts que quand ils émergent au niveau de la canopée où ils sont alors exposés à un éventuel déracinement par le vent.

On a récemment ré-analysé les données météorologiques de mesure des vents de surface (vent à 10 mètres de hauteur) qui confirment dans l'hémisphère nord une tendance au ralentissement. Il semble que les forêts puissent, dans une certaine mesure, freiner le vent et la désertification l'exacerber. Là où

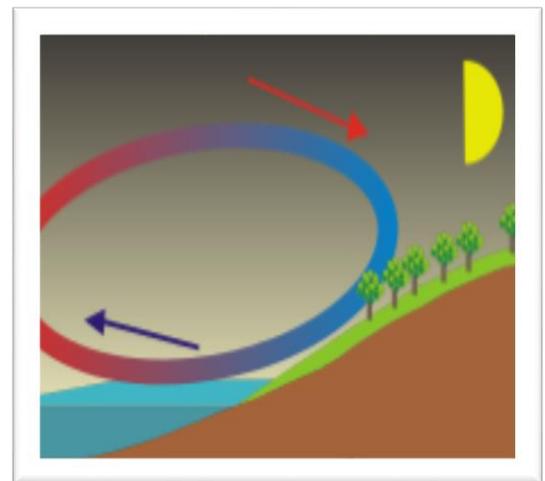
la forêt a regagné du terrain, la force du vent a diminué (de 5 à 15 %), de manière d'autant plus visible que le vent est fort. Les vents géostrophiques (induits par les variations de pression atmosphérique) n'ont pas diminué, et les radiosondes ne montrent pas de tendance au ralentissement en altitude. Le bocage est une structure éco paysagère qui modifie également les effets du vent en créant des microclimats atténuant le vent, mais aussi les chocs thermo-hygrométriques et l'érosion des sols.

1.5.6 Régime de brise

Durant le jour, près des côtes d'un lac ou de la mer, le soleil réchauffe plus rapidement le sol que l'eau. L'air prend donc plus d'expansion sur terre et s'élève créant une pression plus basse que sur le plan d'eau. Une fois encore cette différence de pression se crée sur une distance très faible et ne peut être contrebalancée par les forces de Coriolis. Une brise de mer (lac) s'établit donc. La même chose se produit la nuit mais en direction inverse, la brise de terre.



Brise de mer (haut)



Brise de terre (bas)

Figure I.11 : Régime de brise

On observe des différences de pressions jusqu'à deux millibars et proportionnelles aux masses de terre et d'eau en présence. Cette brise peut résister à un autre vent jusque de l'ordre de 15 km/h (8 nœuds) ; au-delà, elle est en général annulée ce qui ne signifiera pas un calme plat mais plutôt un système météo instable. Ceci explique également pourquoi il y a très rarement un calme plat en bord de mer mais aussi des vents plus tourmentés qu'à l'intérieur des terres ou en mer.

1.5.7. Effets des vallées (goulets)

Dans certaines conditions de contraintes, par exemple dans des vallées très encaissées, l'air ne peut que suivre un chemin. Si le gradient de pression devient perpendiculaire à la vallée, le vent sera généré exclusivement par la différence de pression. C'est le vent antitriptique. On trouve aussi des accélérations dans les resserrements par effet Venturi qui donne un « vent de goulet » et un « courant-jet de sortie de vallée » alors que l'air descendant la vallée envahit la plaine.

1.5.8. Effets de méso-échelle

Dans d'autres cas, la pression et la force centrifuge sont en équilibre. C'est le cas des tornades et des tourbillons de poussières où le taux de rotation est trop grand et la surface de la trombe est trop petite pour que la force de Coriolis ait le temps d'agir.

Finalement, dans le cas de nuages convectifs comme les orages, ce n'est pas la différence de pression mais l'instabilité de l'air qui donne les vents. Les précipitations ainsi que l'injection d'air froid et sec dans les niveaux moyens amènent une poussée d'Archimède négative (vers le bas) dans le nuage. Cela donne des vents descendants qui forment des fronts de rafales localisés.

1.6. Description de la variation du vent : La distribution de Weibull

Modèle général des variations de la vitesse du vent

Il est très important pour l'industrie éolienne d'être en mesure de décrire les variations de la vitesse du vent. Les fabricants utilisent ces informations pour optimiser la conception des éoliennes dans le but de minimiser les coûts liés à la production d'électricité. Les investisseurs, eux, ont besoin de ces informations afin de pouvoir estimer le revenu lié à la production d'électricité.

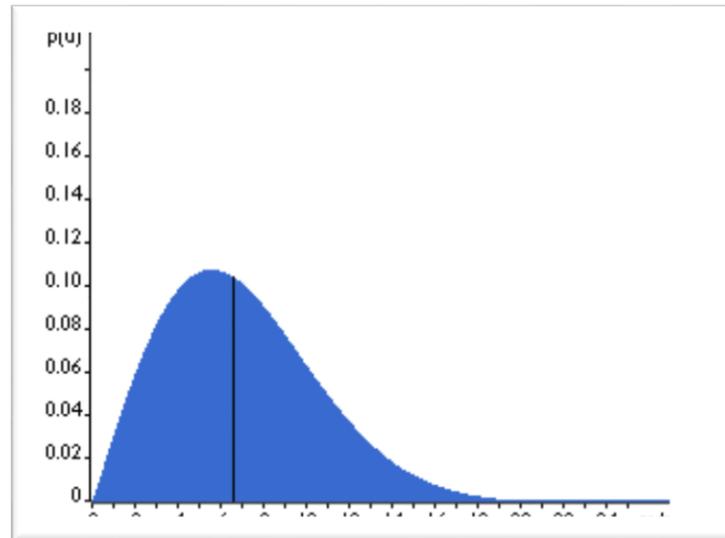


Figure I.12 : La distribution de Weibull

Si vous mesurez la vitesse du vent durant une année, vous remarquerez que, dans la plupart des régions du monde, les vents extrêmes sont très rares alors que des vents frais ou modérés sont assez fréquents.

On décrit normalement les variations du vent sur un site donné en utilisant une distribution de Weibull comme celle que vous voyez sur l'image ci-dessus. Sur le site en question, la vitesse moyenne du vent est de 7 m/s, et la forme de la courbe est déterminée par ce qu'on appelle un paramètre de forme égal à 2.

Ceux qui sont déjà habitués à travailler avec des statistiques se rendront tout de suite compte que ce que le graphe ci-dessus représente est une distribution de probabilité (distribution fréquentielle). La probabilité que le vent souffle à une vitesse quelconque (zéro inclus) étant obligatoirement égale à 100 %, la zone au-dessous de la courbe sera toujours égale à exactement 1. La moitié de la zone bleue se trouve à gauche de la ligne verticale noire située à 6,6 m/s. On dit alors que 6,6 m/s est la médiane de la distribution. Cela signifie que le vent souffle à moins de 6,6 m/s la moitié du temps, et à plus de 6,6 m/s pendant l'autre. Vous vous demandez peut-être pourquoi nous avons alors fixé la vitesse moyenne à 7 m/s. Voici l'explication : la vitesse moyenne est en fait la moyenne des vitesses de vent enregistrées

sur le site en question. Comme vous pouvez le voir sur le graphe, la distribution des vitesses du vent est oblique, donc asymétrique. Parfois il y aura des vents très forts, mais ce ne sera que très rarement. En revanche, les vitesses de vent de 5,5 m/s sont les plus fréquentes. On dit alors que 5,5 mètres par seconde est la valeur modale de la distribution. Si nous multiplions chaque petit intervalle de vitesse par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse de vent particulière, et que nous totalisons ensuite tous les résultats, nous obtiendrons la vitesse moyenne du vent. La distribution statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à l'autre vu qu'elle dépend des conditions climatiques locales, le paysage et sa surface. La distribution de Weibull tend donc à varier, tant en forme qu'en valeur moyenne. Dans le cas où le paramètre de forme est égal à exactement 2, comme c'est le cas pour le graphe ci-dessus.

1.7. Technologie des grands aérogénérateurs

Evolution de la technologie et de l'offre commerciale

L'évolution de la technologie des aérogénérateurs de type « danois » profite depuis une quarantaine d'années des efforts de R&D effectués par de nombreux laboratoires de recherche et par les constructeurs : entreprises spécialisées telles que VESTAS, ENERCON, REPOWER, GAMESA, etc. ou Divisions de grands groupes positionnés sur le secteur de l'énergie : GENERAL ELECTRIC, SIEMENS, ALSTOM, AREVA, etc. A partir des années 2000, de nouveaux constructeurs connaissent un développement soutenu en Asie du Sud-Est et apportent leur contribution. En Chine : GOLDWIND, SINOVEL, etc. ou en Inde : SUZLON, par exemple.

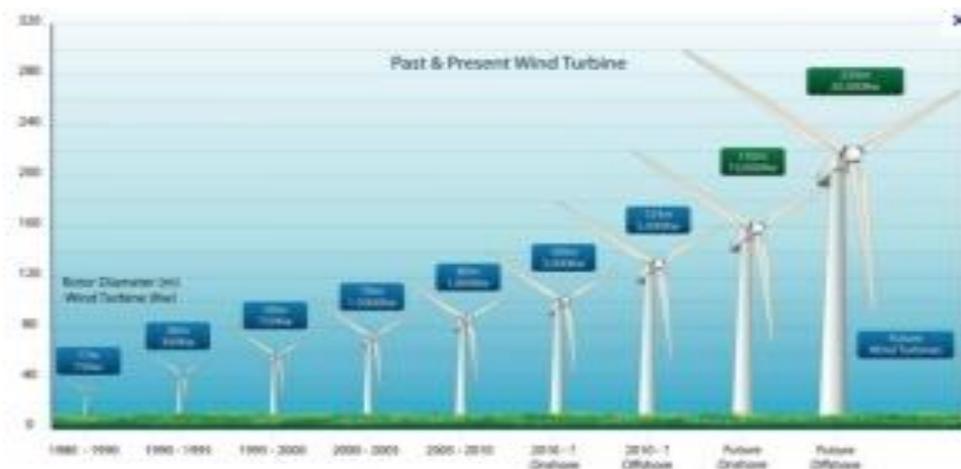


Figure 1.13: Evolution des dimensions et de la puissance nominale des aérogénérateurs commerciaux

Les aérogénérateurs, qui sont aujourd'hui commercialisés, bénéficient d'un retour d'expérience diversifié accumulé sur plusieurs décennies sur des sites très variés quant à la localisation, au gisement éolien, aux conditions de l'environnement (température, humidité, acidité ou salinité de l'air, présence ou non de poussières, etc.).

Sur la base du progrès technologique qui est incrémental, les aérogénérateurs « danois », 3 pales face au vent, relèvent d'une offre commerciale diversifiée couverte par des dizaines de constructeurs dont bon nombre sont d'envergure internationale. Ils ont vu s'accroître : puissance nominale, productivité énergétique de même que disponibilité en phase d'exploitation et fiabilité à long terme. L'amélioration de la technologie des aérogénérateurs concourt à diminuer le prix de revient actualisé du MWh produit et par conséquent, à améliorer le positionnement de la filière de production d'électricité éolienne, par comparaison aux filières de production conventionnelles utilisant le charbon ou le gaz naturel, par exemple.

De nos jours, la puissance nominale des aérogénérateurs regroupés au sein de parcs éoliens terrestres raccordés au réseau de distribution publique est très généralement comprise entre 2 et 3 MW.

1.8. Caractéristiques aérodynamiques des turbines, intérêt de la vitesse variable

Aérodynamique des turbines, intérêt de la vitesse variable

Si l'on considère une turbine, par exemple tripale, pour un calage des pales donné, le rendement aérodynamique C_p est une fonction du rapport de la composante normale V_n de la vitesse de l'écoulement d'air (la vitesse du vent qui arrive perpendiculairement au plan de rotation de la turbine) sur sa composante tangentielle en extrémité de pales.

$$\Omega = 2.\pi \frac{N}{60}$$

Cette vitesse tangentielle est elle-même égale au produit du rayon R de la turbine par la vitesse angulaire Ω de rotation (en radians par seconde, avec, si N est la vitesse exprimée en tours par minute :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V_n}$$

Ce rapport, noté en anglais « tip speed ratio » (TSR), et souvent appelé λ , s'exprime donc par :
L'allure typique de la courbe $C_p(\lambda)$ est donnée à la figure suivante :

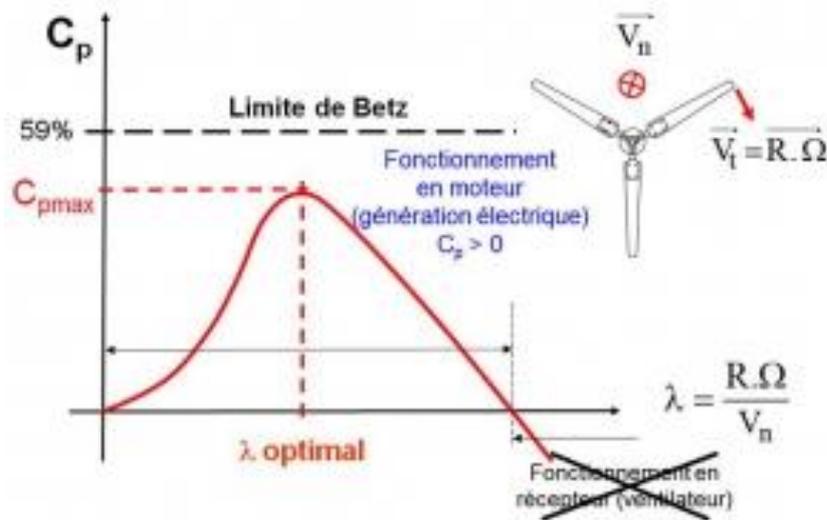


Figure 1.13: Evolution du coefficient de puissance ou rendement aérodynamique en fonction du «tip speed ratio»

A vitesse de rotation donnée, λ varie inversement proportionnellement à la vitesse du vent, la courbe de C_p passe, pour une valeur λ_{opt} , par un maximum C_{pmax} nécessairement inférieur à la limite de Betz (59%). Les valeurs de C_p positives correspondent à un fonctionnement moteur de la turbine qui entraîne la génératrice électrique et permet de produire de l'électricité. Quant aux valeurs négatives, qui sont obtenues lorsque la vitesse de rotation est trop grande eu égard à la vitesse du vent, elles correspondent à un fonctionnement en ventilateur que l'on se garde évidemment de réaliser dans les applications d'aérogénérateur.

Typiquement, pour une turbine tripale λ_{opt} possède, selon le profil des pales, une valeur aux environs de 6, il en résulte que le rendement aérodynamique est maximum pour une vitesse tangentielle en bout de pale égale à 6 fois la vitesse du vent et il en résulte une vitesse de rotation optimale permettant de maximiser la récupération de l'énergie éolienne. Par exemple dans ce cas, pour une turbine de 50 m de rayon avec un vent de 10 m/s, $\Omega_{opt} \approx 1,2$ rad/s (soit 11,5 tr/min). Si l'on souhaite récupérer le maximum d'énergie du vent, il est intéressant de maintenir une vitesse de rotation proportionnelle à la vitesse du vent. C'est sensiblement ce qui est réalisé sur les machines, dites à vitesse variable, dans la zone de vitesses de vent comprises entre le démarrage et le point nominal.

La section suivante présente les différentes solutions technologiques de chaînes de conversion permettant d'obtenir le fonctionnement à vitesse variable qui s'est généralisé progressivement depuis le début des années 2000.

1.9. Cinétique du vent – conversion énergie mécanique.

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique.

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

1.10. Énergie cinétique du vent – conversion énergie mécanique

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique.

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site

Loi de betz

D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \cdot \rho \cdot v^3$$

Avec $S_{éolienne}$ la surface balayée par l'éolienne, ρ la masse volumique de l'air ($1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$) et v la vitesse du vent.

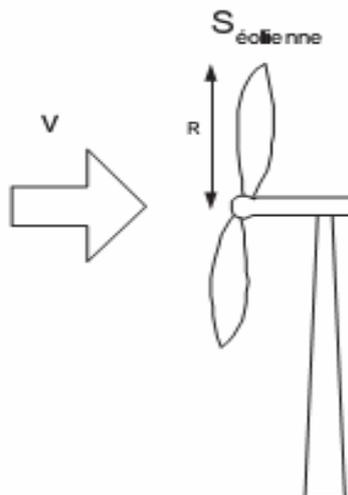


Figure 1.14: Eolienne simplifiée

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}).

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{\text{éolienne}}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p P_{\text{vent}}$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à $16/27$.

Le coefficient C_p , diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β_i et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v}$$

Avec R le rayon des pales de l'éolienne, Ω la vitesse de rotation de l'éolienne et v la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques.

L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique :

$$C_p(\lambda, \beta_i) = (0.44 - 0.0167\beta_i) \sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15 - 0.3\beta_i}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta_i$$

Avec β exprimé en degrés.

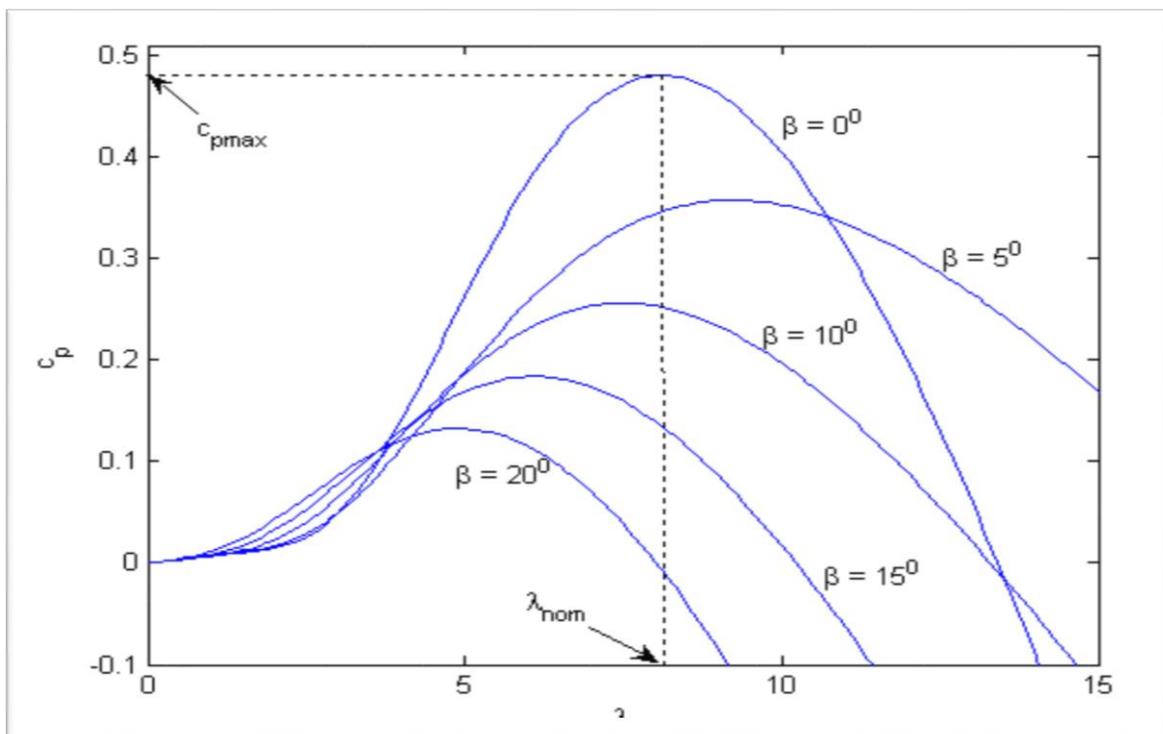


Figure 1.15: Coefficient de puissance C_p

La figure I-14 représente le coefficient de puissance C_p (calculé à partir de l'équation $C_p(\lambda, \beta)$) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à $\lambda_{optimal}$ à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. $\lambda_{optimal}$ correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{optimal}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent.

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement). Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38%. Au vu de la caractéristique suivante (Figure II-3), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maximales théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

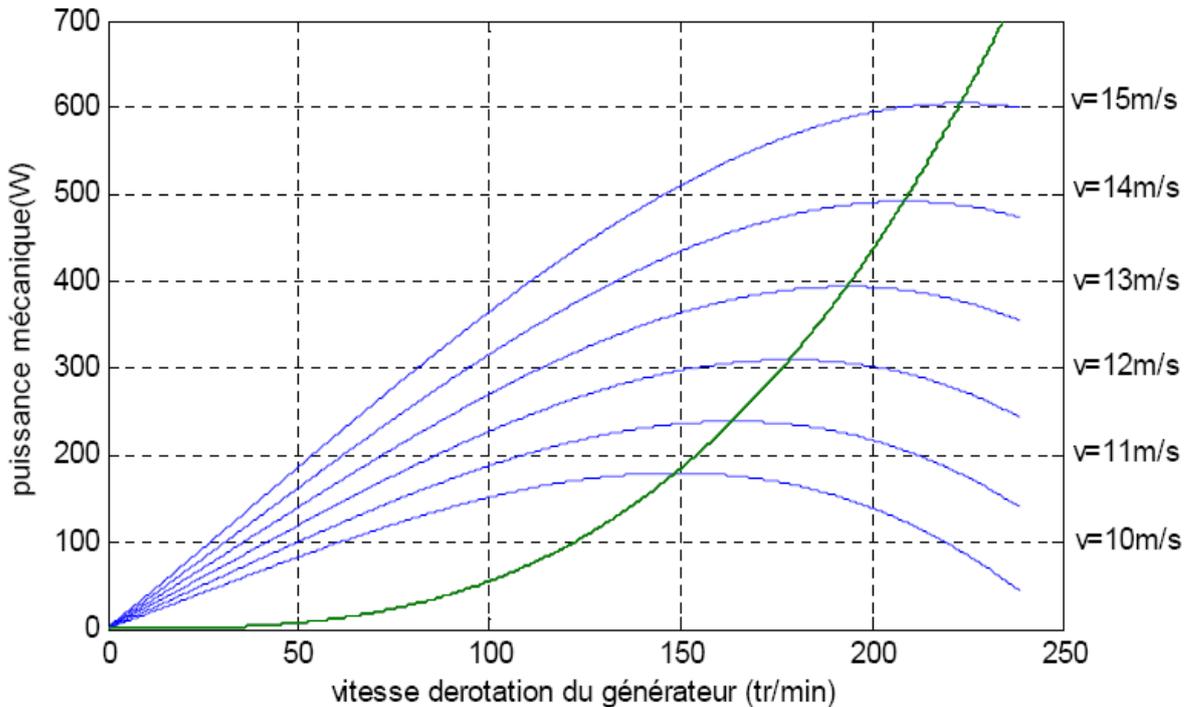


Figure 1.14: courbes de puissance en fonction de vitesse du générateur

1.11. Qu'est-ce que l'énergie éolienne ?

L'énergie éolienne qui tire son nom du dieu grecque responsable des vents nommé Eole, est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à mouliner le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en une énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevée au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. Il faut pour produire de l'électricité un apport minimal du vent d'environ 12-14 km/h et des vents de 50-60 km/h pour produire à pleine puissance. Afin d'éviter d'abîmer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h. Éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en:

Énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur.

Énergie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage

1.12. Classification des éoliennes

On classe les éoliennes, en général, selon l'axe de rotation:

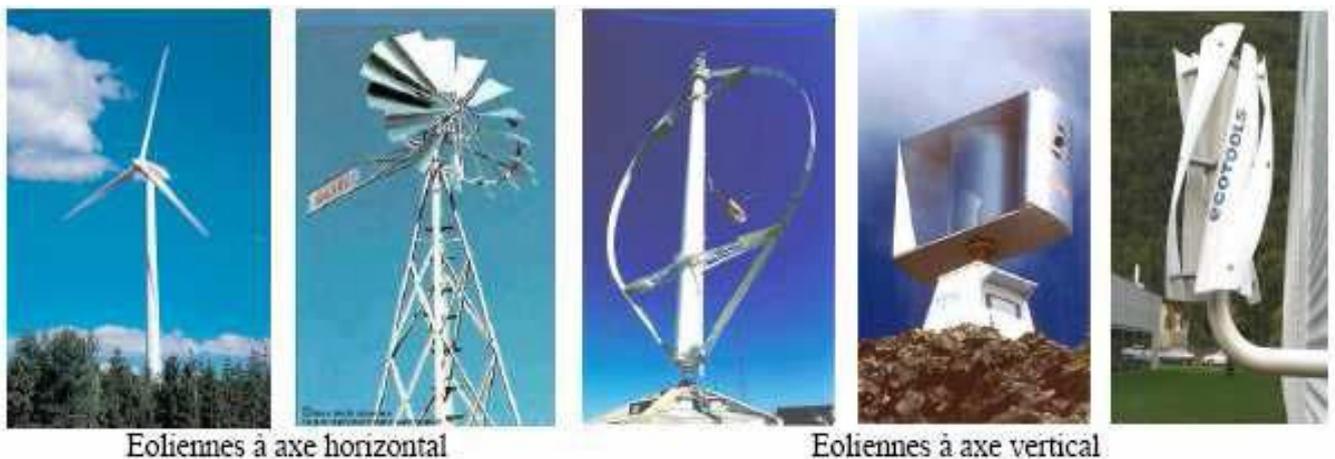


Figure I.15: Classification des éoliennes

1.12.1 Eoliennes à axe horizontal

La plupart des éoliennes modernes utilisent ce principe, avec un nombre de pales variant. On les distingue par le nombre de leurs pales: quadri pale, tripale, bipale,... il existe même des mono pales (avec un contrepoids).

Parmi cette catégorie, on distingue:

Les éoliennes lentes

Ce type d'éolienne possède un grand nombre de pales, cela facilite évidemment le démarrage grâce à son couple élevé. Mais cela constitue un inconvénient lorsque la vitesse s'accroît à cause des vibrations. Ces éoliennes ne peuvent pas atteindre des vitesses élevées. Ces éoliennes sont utilisées comme des aéromoteurs notamment pour le pompage.

Les éoliennes rapides

A l'inverse des éoliennes lentes, les éoliennes rapides (les mono pales, les bipales, et les tripales) doivent parfois être lancées par un moteur électrique; cependant, une fois lancées, elles rendent l'énergie consommée au démarrage. Si la vitesse du vent est élevée les vibrations sont trop importantes et risquent de briser les pales, pour cela l'éolienne est freinée puis arrêtée à une vitesse de l'ordre de 20 à 25 m/s. Ces éoliennes rapides conviennent mieux à la production d'électricité. C'est ce type d'éolienne qui fait l'objet de ce travail, et dont l'objectif est l'étude du multiplicateur du point de vue conception.

1.12.2. Eoliennes à axe horizontal Amont

Le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif d'orientation.

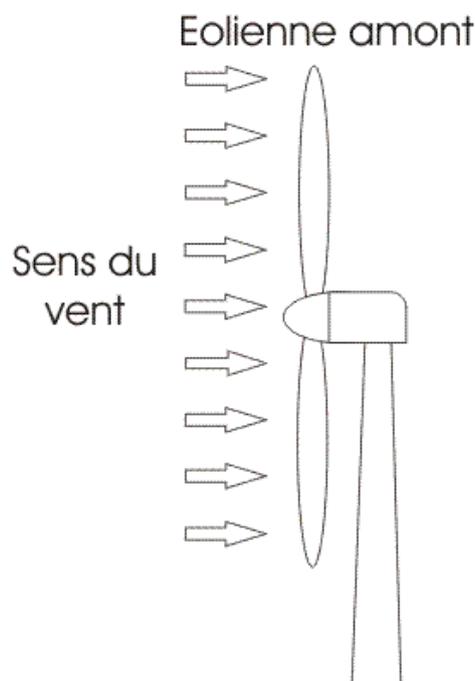


Figure I.16: Schéma d'une éolienne à axe horizontal en amont

1.12.3. Eoliennes à axe horizontal Aval

Le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car elle est plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pâles des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

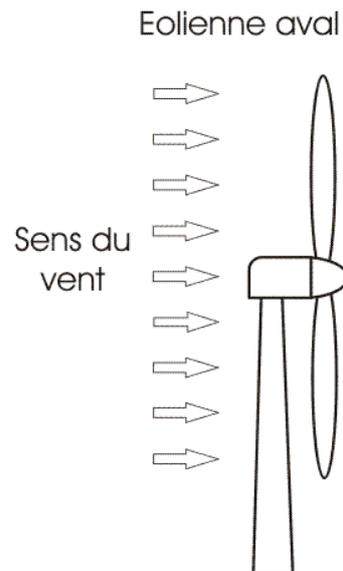


Figure I.17: Schéma d'une éolienne à axe horizontal en aval

Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle

Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son

encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch).

Ce type d'éolienne est caractérisé par son axe vertical. Il utilise le principe de fonctionnement omnidirectionnel, qui a l'avantage de capter les vents d'où qu'ils viennent, sans besoin de mécanisme d'orientation. Un autre avantage dans ce type d'éolienne est la taille des pales, qui n'est pas aussi contraignante, comparée à celle du type à axe horizontal. Plusieurs modèles d'éoliennes à axe vertical ont été conçus, mais les deux modèles les plus célèbres sont ceux de Darrieus et de Savonius. Tous les modèles de cette catégorie sont restés au stade du prototype, car elles ne sont pas rentables actuellement, mais tous témoignent d'ingéniosité. Avec la faillite du dernier fabricant, Flowind (USA), les éoliennes à axe vertical ne sont pratiquement plus fabriquées aujourd'hui, mais elles feront encore rêver longtemps les ingénieurs car leur simplicité est attrayante

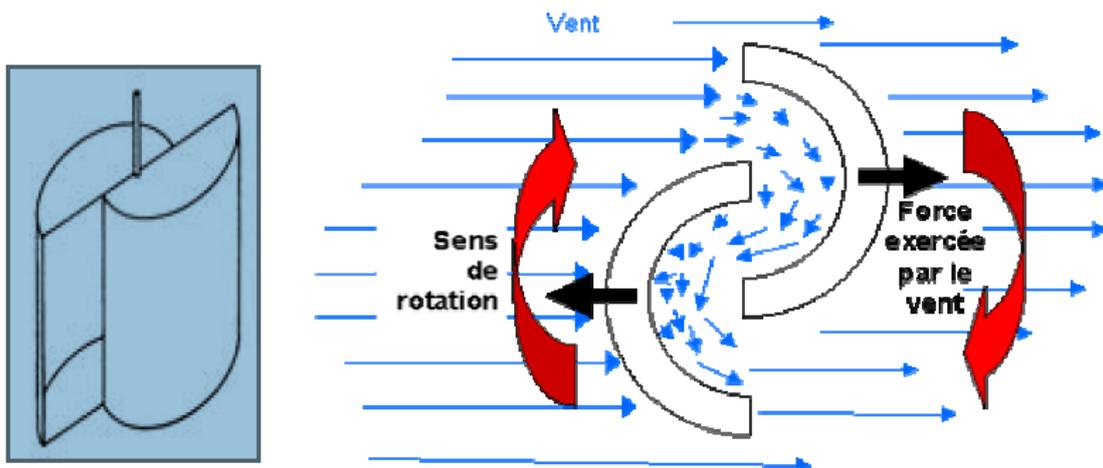


Figure I.18: Eolienne de Darrieus

Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.

- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

1.13. Les différents types d'éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I-2 présente une classification des turbines éoliennes.

Tableau I-2 : classification des turbines éoliennes

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de	12 m Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Les raisons pour choisir une grande éolienne

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

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

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

1.14. Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

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

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

Chapitre II : généralités sur les éoliennes

2.1. Descriptif d'une éolienne

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique.

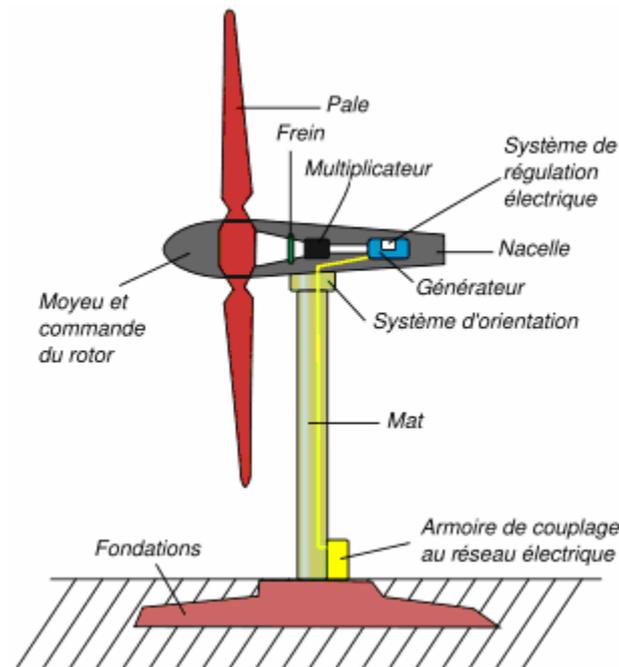


Figure 2.1: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

Pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol.

S'agissant du mât, il doit être dimensionné précisément en fonction de la machine, des fondations... Plusieurs systèmes existent : haubané, haubané basculant, treillis, autoporteur... Pour qu'une éolienne produise... Quelques notions importantes Diapositives Plusieurs éléments doivent être pris avant installation. L'éolienne doit être adaptée au site et à ses besoins,

Il faut vérifier le vent, on considère qu'un site est exploitable lorsque l'on dispose d'une vitesse minimale de vent de 4m/s, à une hauteur du sol de 10m. La donnée 'vent' est essentielle à l'installation d'une éolienne, cependant le coût d'une étude précise, à l'aide d'un anémomètre peut se révéler élevé.

Il faut que cela reste cohérent avec le prix global de votre projet. L'observation du site (la présence de moulins, d'éoliennes altitude, vents dominants, végétation...) et l'intuition peuvent se révéler de bons indicateurs du potentiel éolien dans un premier temps. Ce potentiel conditionnera le choix d'une machine de puissance nominale adaptée. Un autre critère important reste l'évaluation de ses besoins en électricité au regard de ces consommations journalières et annuelles. Cette étape permettra également de réfléchir plus largement à maîtriser ses consommations électriques.

Pratiquement, c'est beaucoup plus complexe : les éoliennes doivent résister à des tempêtes aussi violentes que celles que nous connaissons en Bretagne. Les principaux avantages de l'énergie éolienne sont l'autonomie en électricité, la possibilité de produire de jour comme de nuit et un impact environnemental réduit par des précautions simples vis à vis de la population et du paysage. L'énergie produite peut être soit stockée dans des batteries, soit injectée aux normes dans le réseau. Cette dernière solution étant économiquement et techniquement beaucoup plus pertinente.

2.2. Fonctionnement

Quand le vent se lève, l'unité centrale grâce à la girouette située à l'arrière de la nacelle, commande aux moteurs d'orientation de placer l'éolienne face au vent. Les trois pales sont mises en mouvement par la seule force du vent. Elles entraînent avec elles l'arbre principal qui est lié à l'arbre d'entrée du multiplicateur. Dès que la vitesse du vent sera suffisante (4 m/s soit environ 15 km/h), l'éolienne peut être couplée au générateur par l'arbre de sortie du multiplicateur et peut fournir de l'électricité au réseau. Les pales tournent alors à une fréquence de rotation de 30 tours par minute et entraînent le générateur à 1500 tours par minute. Cette fréquence de rotation restera constante tout au long de la période de production. Lorsque la vitesse du vent atteint (14 m/s soit 50 km/h), l'éolienne fournit sa puissance nominale. Le générateur délivre alors un courant électrique alternatif à la tension de 690 volts à 50 Hz dont l'intensité varie en fonction de la vitesse du vent. Ainsi, lorsque la vitesse du vent croît, la portance s'exerçant sur les pales augmente et la puissance délivrée par le générateur s'accroît. Pour des vitesses de vent supérieures à 14 m/s (soit environ 50 km/h), la puissance est maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité hydraulique régule cette portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leurs axes.

Lorsque la vitesse du vent dépasse 25 m/s (soit 90 km/h), les pales sont mises en drapeau (parallèles à la direction du vent) et leur portance devient quasiment nulle. Tant que la vitesse du vent reste supérieure à 90 km/h, le rotor de l'éolienne est « en roue libre » et le générateur est déconnecté du réseau : l'éolienne ne produit plus d'électricité. Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet

en production. Toutes ces opérations sont entièrement automatiques et gérées par l'unité centrale. En cas d'arrêt d'urgence, un frein à disque placé sur l'arbre rapide du multiplicateur permet de stopper l'éolienne afin d'éviter sa destruction. Au pied de l'éolienne, un transformateur convertit la tension de 690 volts en 20000 volts, tension du réseau national d'Électricité de France sur lequel toute l'électricité produite est déversée.

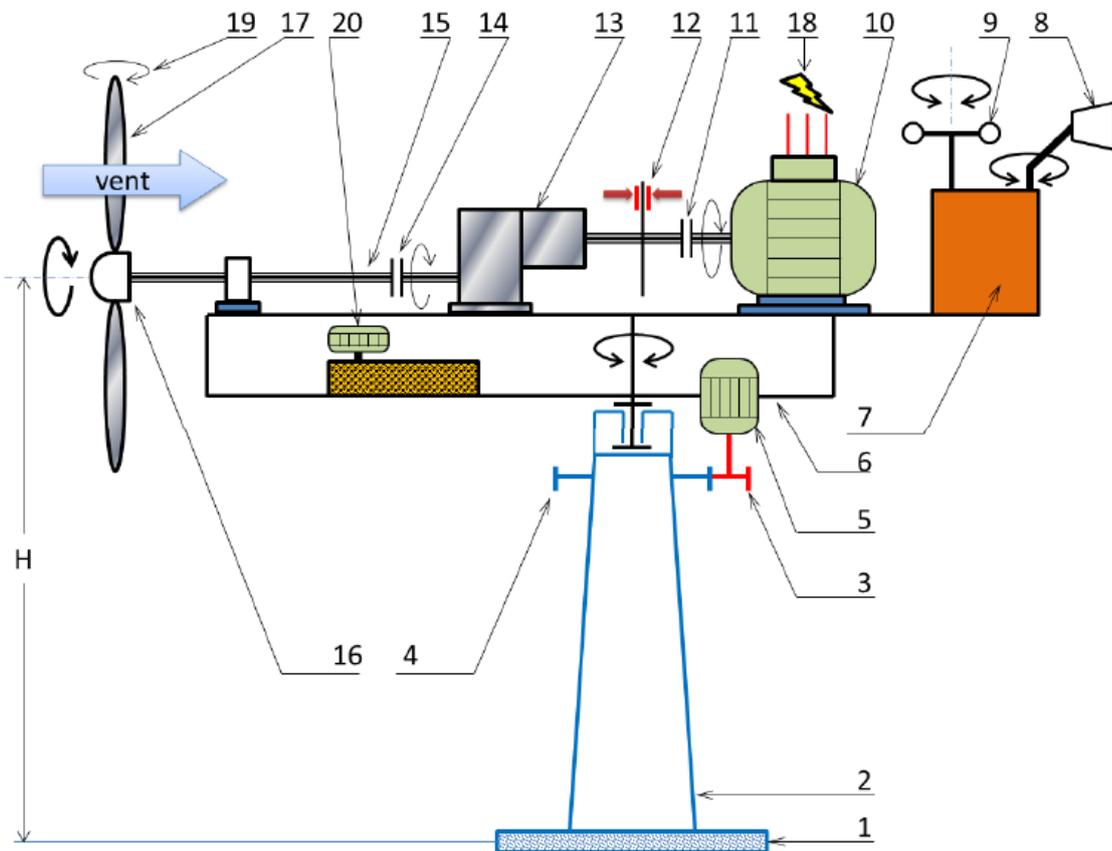


Figure 2.2: principe de fonctionnement de l'éolienne

Tableau 2.1: Différentes parties de l'éolienne

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque

3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité centrale	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique

2.2 Principaux composants

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :

- **le mât**, généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). les éoliennes sont-elles si haut perchées C'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles: relief, arbres, maisons... Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor.

- **un 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 : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. 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 de son diamètre rotor.



Figure 2.3: Rotor d'une turbine

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque. La surface A d'un disque circulaire est égale à :

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2$$

Où r est le rayon du disque circulaire, d est le diamètre et π est ($\pi = 3,1415\dots$). Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

- **une nacelle** montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

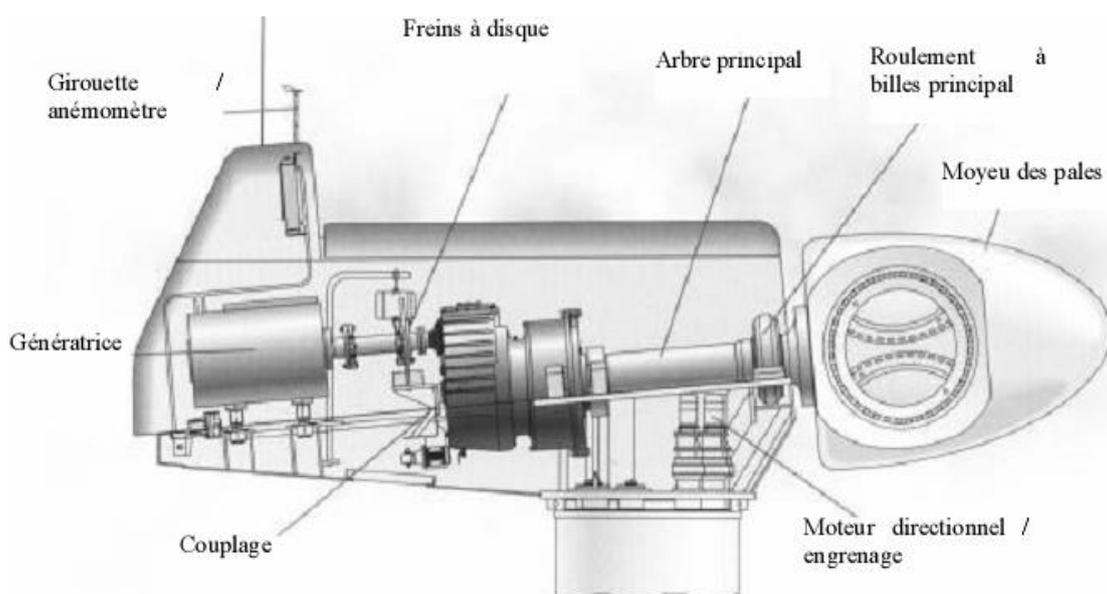


Figure 2.4 : Constitution d'une nacelle

Les différents composants d'une nacelle

Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.

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.

La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite

2-3 principaux composants de l'éolienne moderne

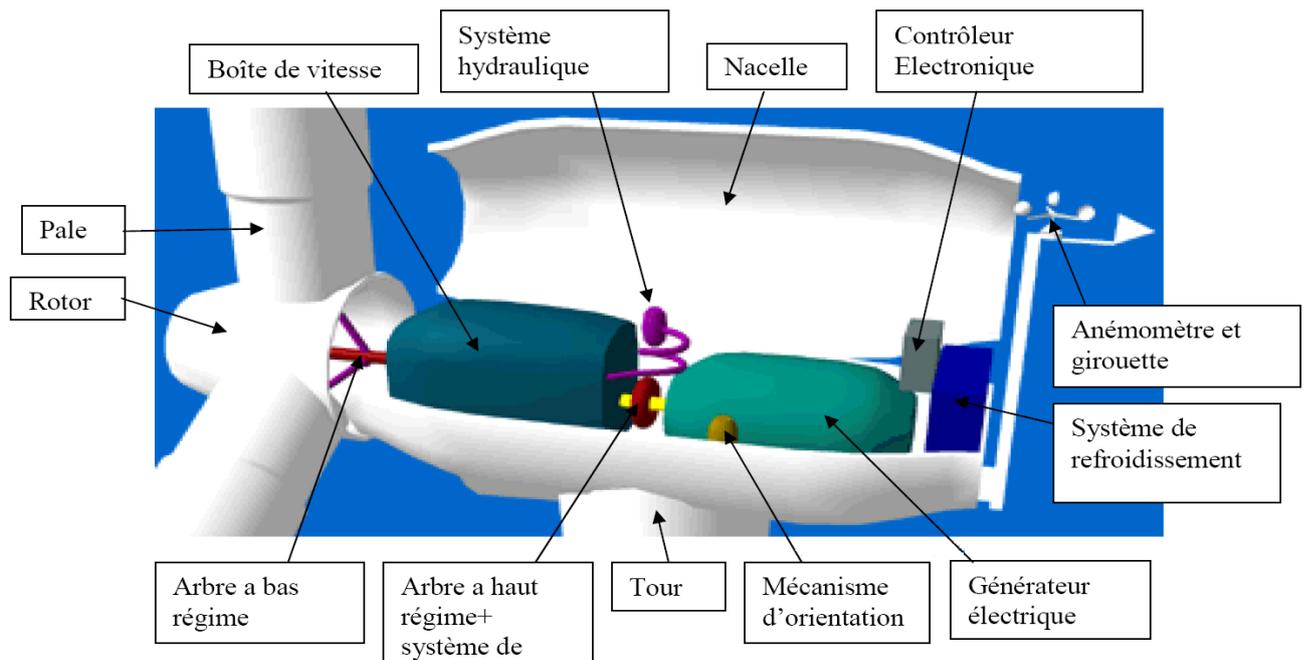


Figure 2.5: Principaux composants de l'éolienne moderne

Mécanisme d'orientation : Utilisé pour tourner la turbine contre le vent. On dit que l'éolienne possède une erreur d'orientation lorsqu'elle n'est pas tournée perpendiculairement au sens du vent. Une telle erreur implique qu'une part plus restreinte de l'énergie contenue dans le vent passera au travers du rotor.

Boite de vitesse: La puissance provenant de la rotation du rotor est transmise au générateur par le biais de 2 arbres de transmission et de la boîte de vitesse. La solution pratique utilisée, en parallèle avec l'industrie automobile, est la mise en place d'une boîte de vitesse. Ainsi la rotation lente et puissante de l'arbre en amont sera transformée en rotation rapide à bas couple en aval de la boîte de vitesse, mieux à même d'être utilisée par le générateur.

Anémomètre et girouette: La mesure de la vitesse du vent est habituellement effectuée à l'aide d'un anémomètre. Possédant un axe vertical et 3 coupoles captant le vent et entraînant sa rotation, le nombre de révolutions effectuées est décompté électroniquement. Généralement couplé à une girouette permettant de déterminer la direction du vent, les informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.

Système de refroidissement: Les générateurs nécessitent la mise en place d'un système de refroidissement pour leur bon fonctionnement. Dans la plupart des éoliennes, le refroidissement se fait en plaçant le générateur dans un conduit d'air frais.

Certains fabricants utilisent en refroidissement par eau. Cela présente l'avantage d'être plus compact mais nécessite la mise en place d'un radiateur dans la nacelle pour évacuer la chaleur contenu dans le liquide de refroidissement

2.4. Structure générale de la transmission de puissance d'une éolienne

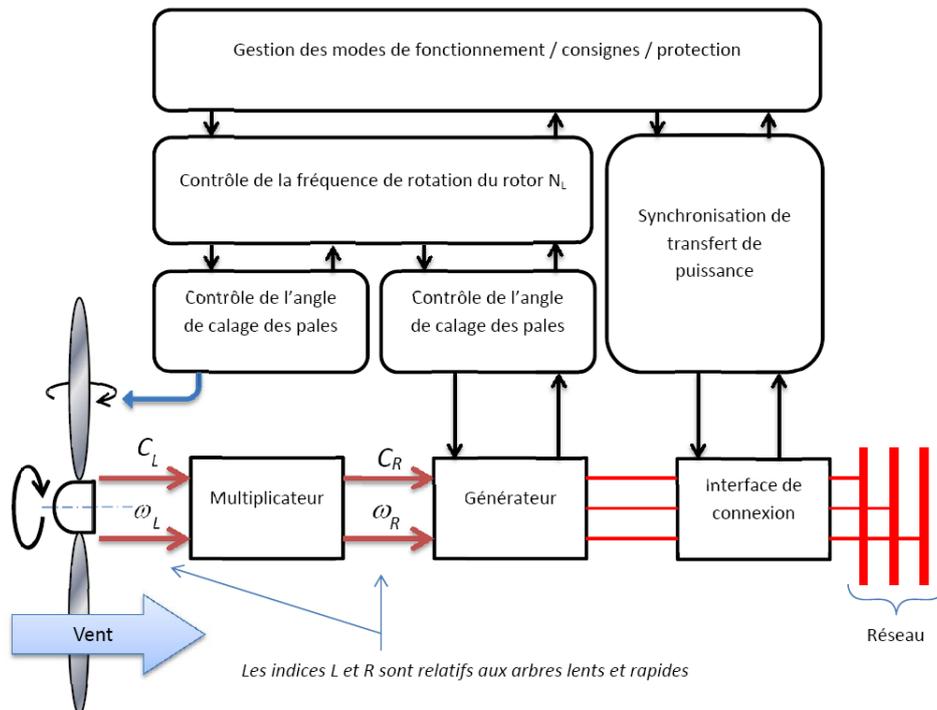


Figure 2.6: structure générale de la transmission.

Les conditions de fonctionnement d'un aérogénérateur dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. La courbe de puissance donnée par le constructeur optimise la plage d'exploitation de l'éolienne en fonction de puissance nette transmise au réseau. On définit ainsi :

VD: (vitesse de démarrage) vitesse du vent correspondant au démarrage du rotor.

VN: (vitesse nominale) vitesse minimale du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale P_n du générateur.

VC: (vitesse de coupure) celle du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de sécurité du matériel.

2.5. L'importance du générateur électrique

Le générateur électrique, couplé ou non à un multiplicateur de vitesse selon la technologie retenue (se passer de multiplicateur n'est possible qu'avec des machines synchrones à très grand nombre de

pôles), joue un rôle très important dans la chaîne de conversion énergétique. Jusqu'à la fin des années 1990, la machine asynchrone à cage d'écureuil et sans convertisseur électronique de puissance embarquée au sommet de l'éolienne commerciale type « danois » représentait le générateur électrique de référence. Ses caractéristiques et son comportement électromécanique bien connus, son rapport poids/puissance optimisé, sa fabrication simplifiée susceptible d'être assurée par de multiples fournisseurs en faisaient un composant idéal. Toutefois, le générateur asynchrone présente, du fait même de sa conception, des inconvénients majeurs pour être mis en œuvre pour la conversion de l'énergie éolienne :

La vitesse de rotation du générateur asynchrone est très proche de la vitesse de synchronisme (au glissement près) et ne peut pas suivre les variations rapides de la vitesse de vent et encore moins les phénomènes transitoires (rafales). Ceux-ci créent sur l'arbre de transmission des contraintes et des vibrations conduisant à la rupture prématurée de composants mécaniques (roulements, multiplicateur de vitesse et générateur proprement dit par suite d'échauffements) ou à des phénomènes de découplage réseau intempestifs. Pour améliorer sensiblement la récupération d'énergie, les machines asynchrones comportaient un double bobinage statorique, permettant, grâce à une commutation des enroulements, d'obtenir deux polarités différentes et donc deux vitesses de synchronisme, la plus faible pour les faibles vitesses de vent et la plus grande pour les vitesses de vent les plus élevées. Toutefois, les performances étaient loin de celles permises par la variation électronique continue de la vitesse de rotation.

Enfin, la gestion de l'énergie réactive associée à une machine asynchrone est dans les faits, réalisée par le couplage électromécanique de condensateurs ajusté en fonction de la puissance produite, ce qui n'en fait pas une solution performante, généralement en dehors du cahier des charges imposé aujourd'hui pour le raccordement des turbines éoliennes au réseau de distribution publique dans les pays industrialisés.

Pour répondre d'une part à la variabilité de la ressource éolienne et d'autre part aux exigences (ou codes de raccordement) définis par les gestionnaires de réseaux de distribution, les turbines éoliennes modernes mettent à présent en œuvre :

Soit un générateur asynchrone à rotor bobiné, communément appelé à double alimentation, offrant une vitesse variable de +/- 30% environ autour de la vitesse de synchronisme. Le stator est directement couplé au réseau à fréquence et tension fixes et c'est le bobinage rotorique qui, à travers un système de

contacts glissants (bagues et balais), est connecté à un convertisseur électronique de puissance de puissance réduite (environ 30% de la puissance nominale) permettant de contrôler le couple résistant et donc la vitesse de rotation. Ce type de générateur est alors accouplé sur l'arbre de transmission à un multiplicateur de vitesse à double ou triple étage qui permet d'augmenter la vitesse de rotation dans un rapport proche de 100, ce qui permet d'avoir un générateur plus léger car plus rapide. Cette solution technologique a été longtemps la solution de référence des éoliennes à vitesse variable mais commence à décliner car elle a des inconvénients importants, en particulier lors des micro-coupures (creux de tension) sur le réseau,

Soit un générateur asynchrone à cage, donc sans bagues ni balais, associé à un multiplicateur de vitesse similaire au précédent et à un convertisseur électronique de puissance dimensionné pour la puissance nominale de la machine, avec une très grande plage de réglage de vitesse,

Soit un générateur synchrone (à aimants permanents ou à rotor bobiné) à vitesse variable piloté par un convertisseur électronique de puissance qui traite, comme dans le cas précédent, 100% de la puissance. Un tel générateur peut être placé en attaque directe juste à l'aval de l'ensemble pales-rotor, à condition de réaliser une structure électromagnétique à très fort couple massique et donc à très grand nombre de paires de pôles, ou encore accouplé à un multiplicateur de vitesse similaire à celui des asynchrone (2 ou 3 étages), mais également via un multiplicateur à simple étage [N12], en fonction du nombre de paires de pôles du stator de la machine synchrone.

2.6. La transformation de l'énergie par les pales :

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

2.7. Pourquoi la plupart des éoliennes sont-elles trois pales ?

Le vent étant freiné par les obstacles au sol, la vitesse du vent augmente avec l'altitude. De ce fait, le vent en haut d'une éolienne soufflera plus fort qu'en bas du rotor. Dans le cas d'une éolienne à une ou deux pales, la variation de la force sur le moyeu est alors importante car lorsqu'une pale est au plus haut (captant davantage le vent), l'autre pale est au plus bas (peu de vent), obligeant alors la mise en

place de systèmes spécifiques. En revanche, l'installation de trois pales permet une compensation de ces différences et une moindre variation de puissance à chaque rotation du rotor.

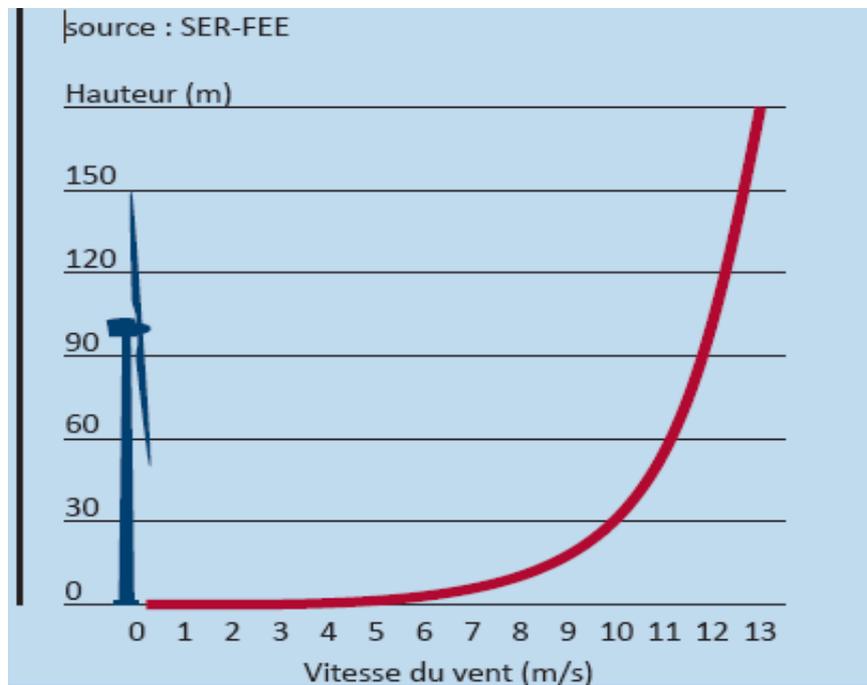


Figure 2.7 : puissance du vent en fonction de l'altitude

2.8. Configuration des pales

L'étude portera sur une éolienne tripale. On définit l'angle azimutal θ_i de la pale i comme étant l'angle entre l'axe principal de la pale avec l'axe horizontal passant par l'axe du rotor.

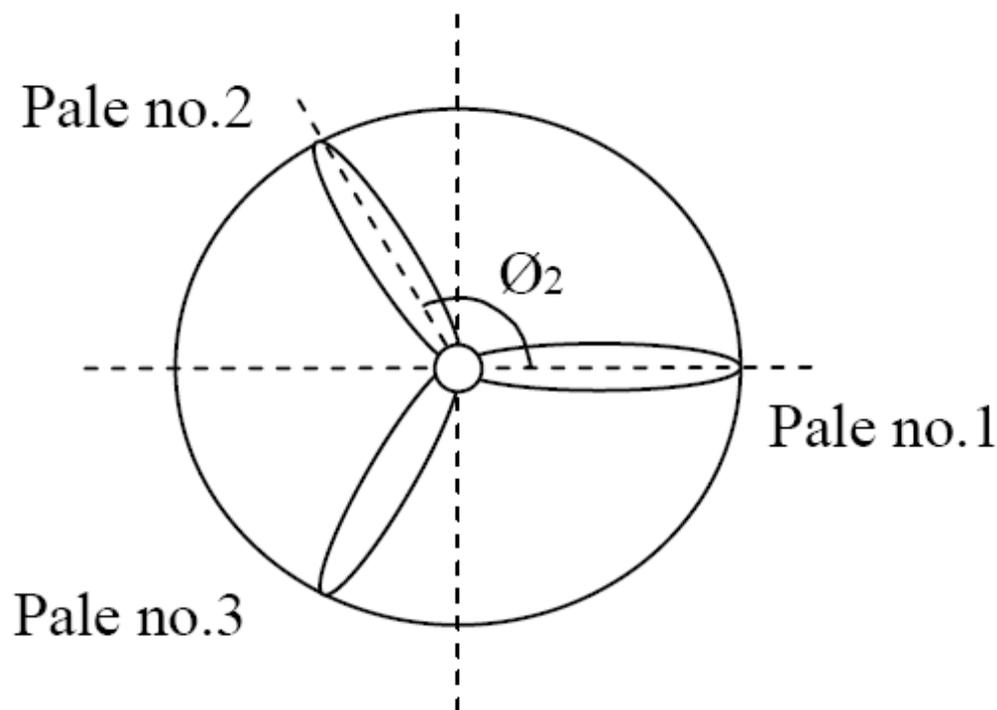


Figure 2.8: Définition de l'angle azimutal

2.9. Cut-in Speed/Cut out speed

Il semble avantageux du point de vue économique de limiter l'extraction de l'énergie éolienne à certaine vitesse de vent maximum. Au dessus de cette valeur, la taille de la colonne doit être plus importante pour résister à des sollicitations accrues. Cette vitesse maximum est appelée « cut off speed » et est définie dans la littérature comme étant la vitesse maximum à partir de laquelle l'éolienne arrête de produire de l'énergie.

Dans les applications rurales, comme pomper de l'eau par exemple, il est souvent désirable que la turbine commence à tourner pour des vitesses de vents incidents aussi faibles que possible. Du point de vue de la production annuelle d'énergie, une aussi basse « cut in speed » n'est pas nécessaire comme cela peut être aisément constaté en considérant à la fois une courbe traduisant la probabilité d'occurrence de chaque vitesse de vent et une courbe traduisant la puissance produite pour chaque vitesse de vent. Trois modes de fonctionnement peuvent être définis :

- Avant la « Cut in speed » et après la « cut off speed », les pales sont placées en position d'arrêt, parallèles au vent incident. De cette manière, elles ne sont que très peu soumises aux charges de vent, mais ne produisent aucune énergie.
- Entre la « cut in speed » et la « rated speed », le rotor tourne à faible vitesse et commence à extraire de l'énergie.
- Entre la « rated speed » et la « cut off speed », le rotor atteint sa vitesse de rotation maximum prévu lors de la conception. C'est le régime de fonctionnement optimal de l'éolienne. Elle est maintenue constante malgré l'augmentation de vitesse du vent incident grâce à l'utilisation d'une boîte de vitesse, ainsi que d'un système de régulation des charges. En effet, certaines éoliennes ont la possibilité de faire tourner les pales sur leur axe, jouant ainsi sur l'angle d'attaque et donc le taux de production d'énergie. Sur cette plage de vitesse, l'énergie produite est considérée comme étant le maximum possible.

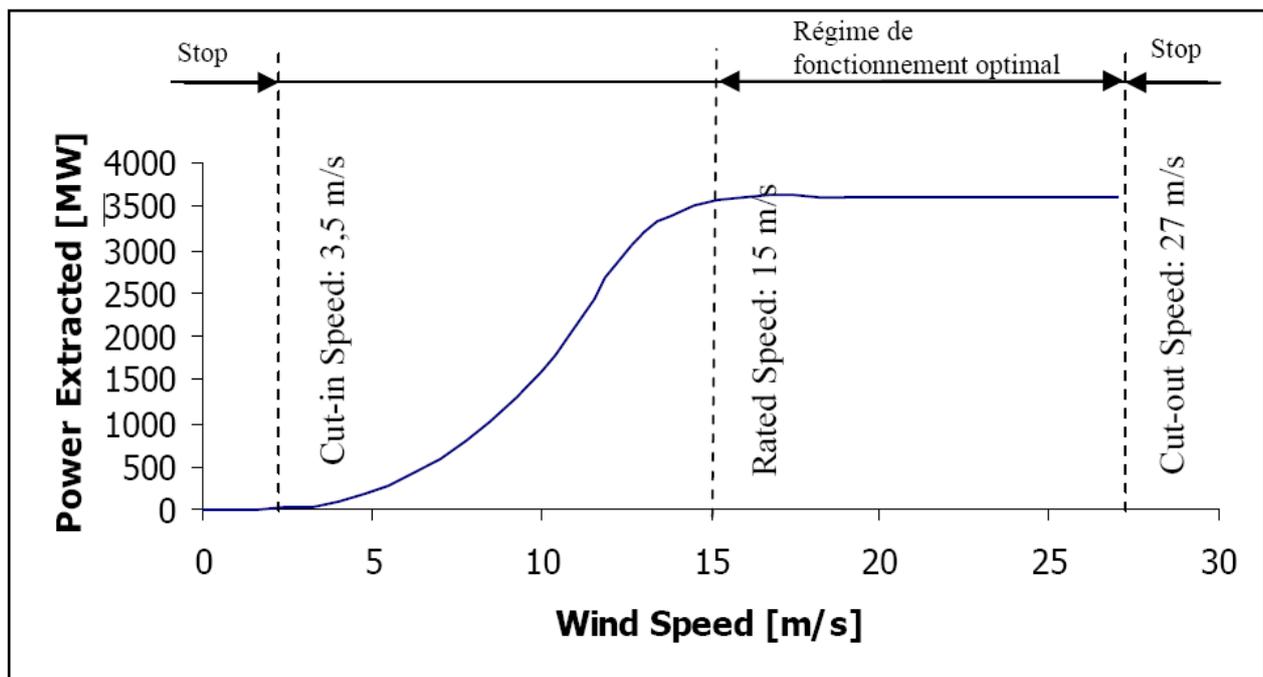


Figure 2.9: Courbe de puissance

2.10. Intégration de l'énergie éolienne dans le système électrique

La production d'électricité éolienne est caractérisée, du fait même des aspects de la ressource éolienne, par plusieurs aspects :

En premier lieu, la production d'électricité éolienne est variable au cours du temps ; elle est susceptible de présenter des fluctuations très rapides sur un site et même à l'échelle d'une région,

- elle est de ce fait à haute variabilité, et souvent qualifiée d'intermittente (laissant entendre à tort une non prédictibilité). Il s'agit d'importantes fluctuations de puissance sur une période donnée (l'année, le mois, journée, l'heure, etc.), lesquelles se traduisent par des écarts significatifs entre les valeurs des puissances maximum et minimum produites,
- elle est enfin prédictible avec un assez bon niveau de qualité à des échelles de temps de l'ordre de 24 h. La simulation en temps réel de la ressource éolienne à l'échelle régionale ou à l'échelle locale essaie d'apporter une réponse la plus fiable possible pour anticiper à court terme la ressource éolienne. En dépit du progrès des logiciels spécifiques, l'expérience montre qu'un écart, parfois important, existe toujours entre la puissance réelle et celle qui était prévue. L'écart se creuse à mesure que la prévision de production vise un horizon de temps plus lointain, c'est à dire supérieur à la journée.

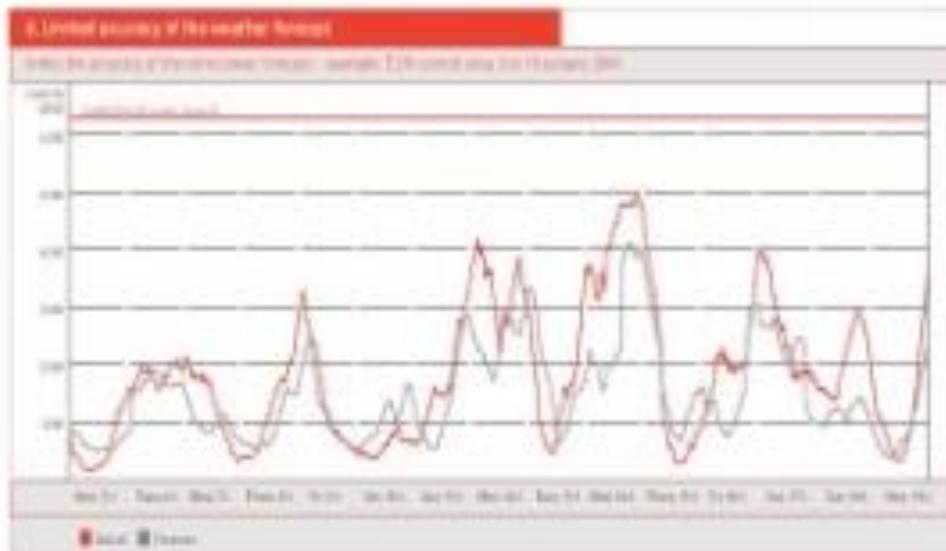


Figure 2.10 : Ecart entre la production d'électricité éolienne réelle et prévue en Janvier 2016. - Source : Wind Report E.ON Netz, 2017

2.11. Etude préliminaire de mécanique des fluides

Le but des éoliennes est de transformer l'énergie contenue dans le vent en mouvement de rotation du rotor afin de produire de l'énergie.

Avant tout, de manière à avoir une bonne description des charges de vents agissant sur le rotor, il est important de bien cerner les concepts fondamentaux de la Mécanique des fluides à la base de la rotation des pales.

L'énergie dans un fluide est contenue sous quatre formes différentes: potentielle, thermodynamique, cinétique et thermique. Les deux premières formes ont un effet négligeable sur la problématique de notre procédé. A pression constante, seule l'énergie cinétique est extraite du vent. En supposant une vitesse constante le long de la ligne de courant lors du passage à travers les pales du rotor (principe de conservation de la masse), l'énergie est alors extraite par une baisse de pression à travers le rotor. L'air situé juste à l'arrière du rotor possède une pression inférieure à la pression atmosphérique. La surpression au-devant du rotor dévie une part de l'air incident autour de la turbine.

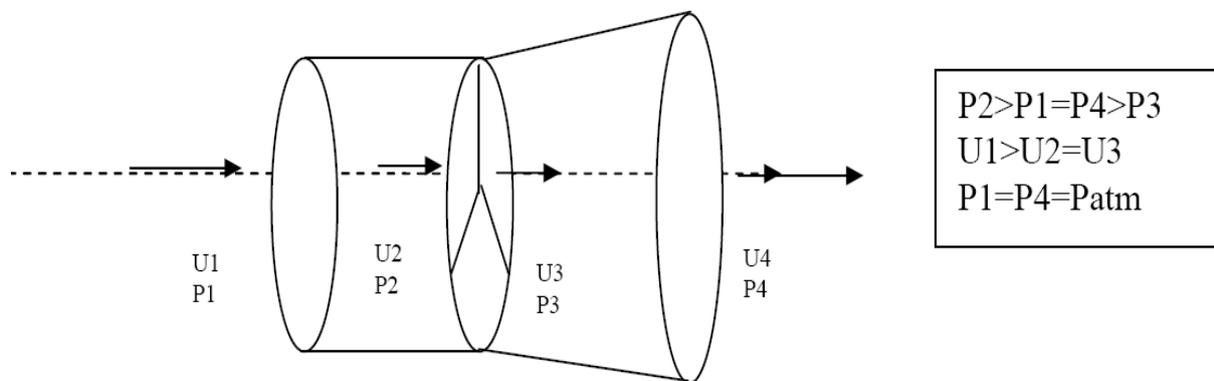


Figure. 2.11: Incidence de l'air autour de la turbine

Partant du principe qu'une partie de l'air incident est déviée autour du rotor, ceci implique que toute l'énergie contenue dans le vent incident ne pourra être extraite.

Albert BETZ fut le premier à déterminer la limite théorique d'efficacité d'une éolienne. Cette limite est connue sous le nom de Limite de BETZ.

Toujours suivant le principe de conservation de la masse, l'apparition d'une surpression en amont du rotor entraîne une réduction de vitesse du vent incident. On peut alors définir le facteur axial d'induction a comme étant la proportion de la réduction de vitesse entre le vent incident et le vent passant à travers le rotor. Il est défini comme suit :

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (1)$$

Utilisant le principe de conservation de la masse et le théorème de Bernoulli, les relations suivantes peuvent être déduites:

$$\begin{aligned} U_2 &= U_1 \cdot (1 - a) \\ U_4 &= U_1 \cdot (1 - 2a) \end{aligned} \quad \text{i.e.} \quad U_2 = \frac{1}{2} (U_4 + U_1) \quad (2)$$

Introduisons maintenant le coefficient de puissance C_p . Il représente le rapport entre l'énergie extraite et l'énergie totale contenue dans le vent. BETZ développa une expression de C_p en fonction du facteur axiale d'induction a :

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3)$$

Le facteur optimal d'induction est $1/3$.

Il permet d'atteindre un coefficient de puissance maximale de $16/27 (=0,59)$.

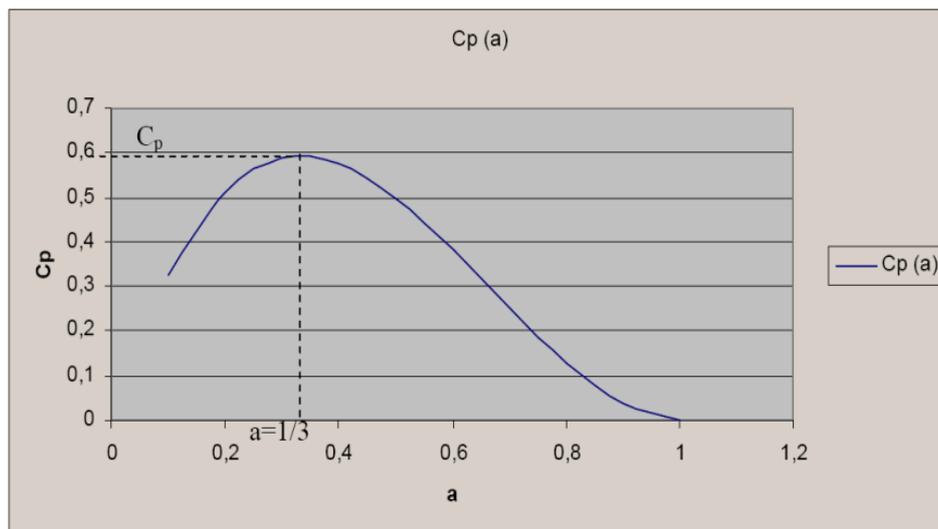


Figure 2.12: Evolution du coefficient de puissance

Un vent opérant à des poussées supérieures (a faible) implique qu'une plus grande quantité d'air est déviée et donc une baisse de l'énergie totale potentiellement exploitable. En revanche, lorsque le coefficient a augmente, la vitesse du vent passant à travers le rotor diminue et donc l'énergie exploitable fonction de la vitesse au cube aussi. Cette étude aérodynamique sommaire pose les bases d'importants concepts que l'on doit garder en mémoire.

Elle ne prend cependant pas en compte d'autres facteurs tout aussi importants comme par exemple la forme de la pale de l'éolienne, la rotation du sillon, les choix techniques portant sur la boîte de vitesse, sur l'arbre de transmission.

2.12. Interaction Pale/Vent

2.12.1. Terminologie

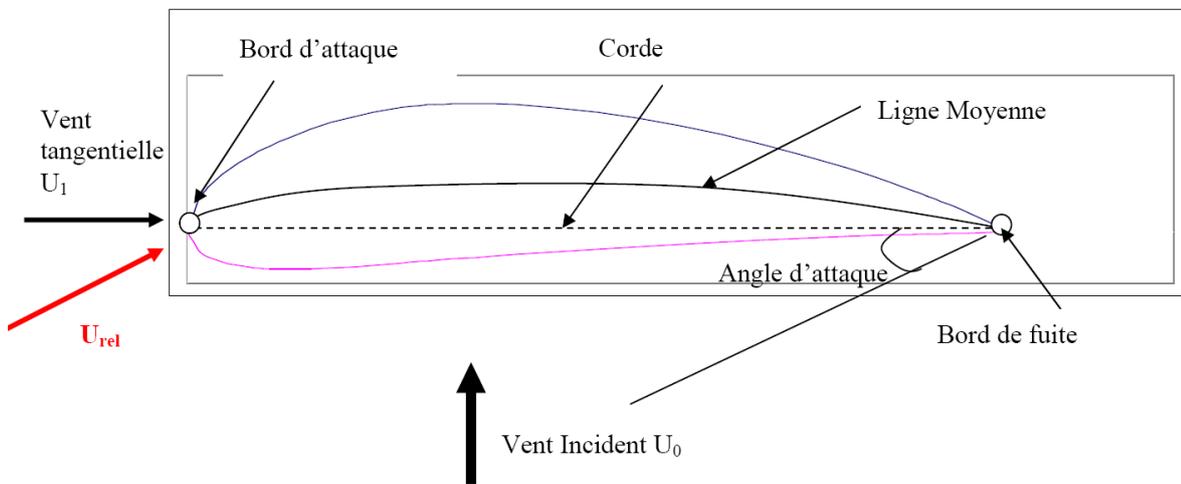


Figure 2.13: coupe transversale d'une pale

2.12.2. Efforts sur une pale

La Fig. 2.8 illustre une coupe transversale d'une pale, vue du bout de la pale, qui se déplace dans un vent incident de vitesse. Du fait de la rotation, la pale est soumise en plus du vent incident de vitesse v , à un vent relatif u dirigé dans le sens contraire de rotation de la turbine. La vitesse de ce vent relatif est donnée par :

$$U = r \cdot \Omega_T \tag{4}$$

Où r est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale en m .

Ω : Test la vitesse de rotation de la turbine en rd/s .

La composition de vitesses de ces deux vents, incident et relatif donne la vitesse du vent

Réel V_{rel} au quel est soumise la pale.

$$\vec{V}_{rel} = \vec{V} + \vec{U} \tag{5}$$

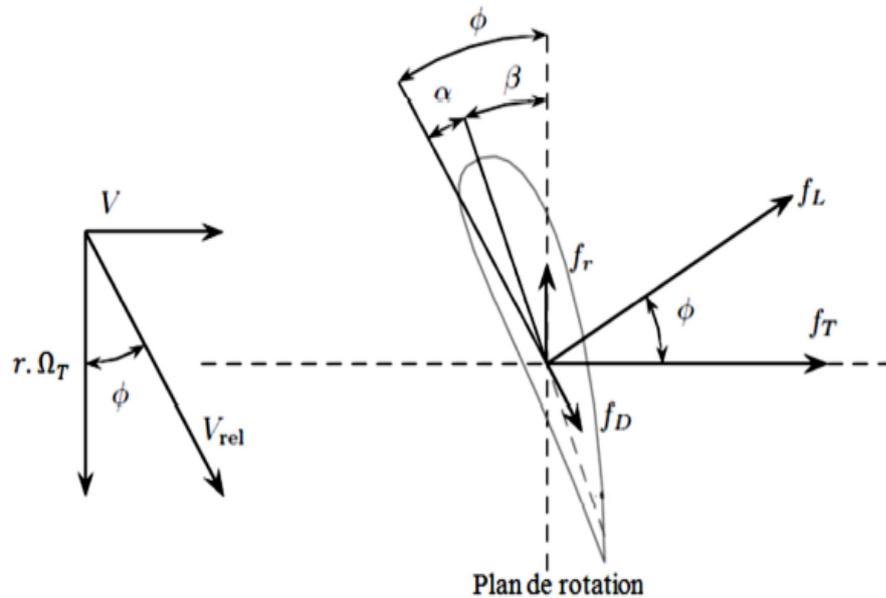


Figure 2.14: Efforts sur un élément d'une pale

2.12.3. Théorie des ailes

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

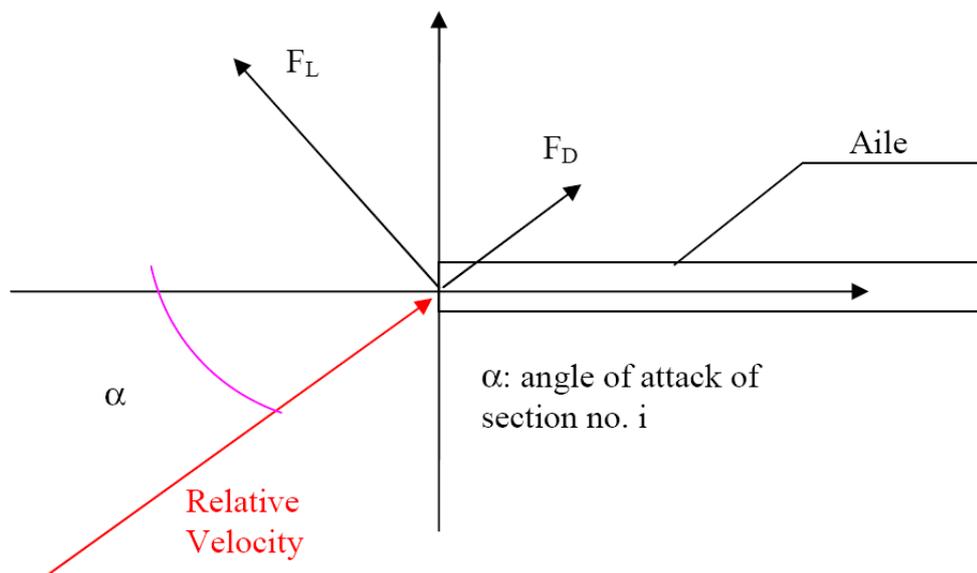


Figure 2.15: force exerçant sur une pale

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

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot U^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot U^2$$
(6)

Où ρ est la masse volumique de l'air.
 A est l'aire projetée du corps immergé.

C_L et C_D Sont respectivement les coefficients de portance et de traînée. Ils sont fonction de la nature et de la forme du corps immergé dans le fluide, de la valeur du nombre de Reynolds caractérisant la nature de l'écoulement et de l'angle d'attaque. Considérons maintenant une section de pale d'éolienne:

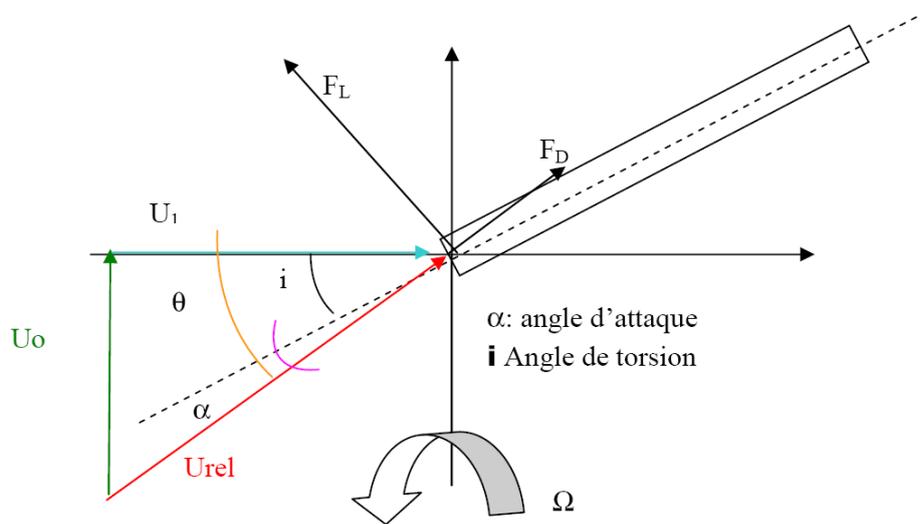


Figure 2.16: Force agissant sur une pale d'éolienne

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

$$U_1 = \Omega \cdot r$$
(7)

Où Ω est la vitesse angulaire de l'aile et r l'abscisse de la section considérée. Finalement, la vitesse relative totale du fluide agissant sur la pale est une combinaison entre U_0 et U_1 :

$$U_{rel}^2 = \Omega^2 \cdot r^2 + U_0^2$$
(8)

$$\begin{aligned}
 F_T &= F_L \cdot \sin \theta - F_D \cdot \cos \theta \\
 F_a &= F_L \cdot \cos \theta + F_D \cdot \sin \theta
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

La force tangentielle fournit la poussée utile sur l'arbre. La force axiale ne fait que charger la structure.

En considérant les équations (9), on peut facilement comprendre que pour augmenter la poussée sur l'arbre et donc l'énergie que l'on peut extraire du vent, il nous faut augmenter les forces de portance et diminuer les forces de traînée. Un angle d'attaque optimum peut être défini pour maximiser le ratio entre C_L/C_D et ainsi atteindre une force tangentielle maximum.

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

$$\theta(r) = \text{ACOS} \left(\frac{U_1(r)}{U_{rel}(r)} \right) = \text{ACOS} \left(\frac{U_1(r)}{\sqrt{U_1(r)^2 + U_0^2}} \right) = \alpha + i(r)
 \tag{10}$$

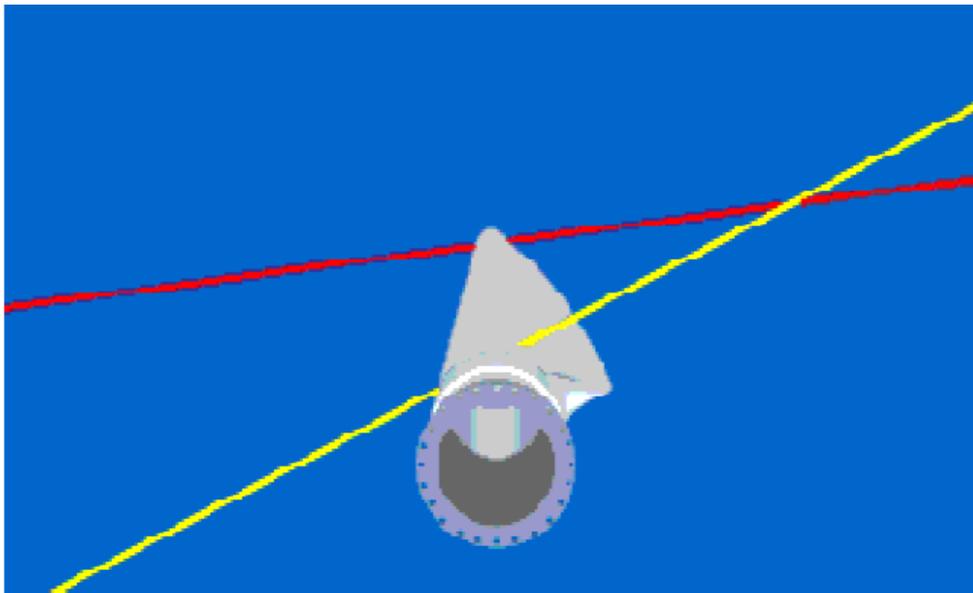


Figure 2.17: Représentation de l'angle de torsion

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

$$i(r) = \text{ACOS}\left(\frac{U_1(r)}{\sqrt{U_1(r)^2 + U_o^2}}\right) - \alpha_{optimum} \quad (11)$$

On peut finalement déduire les forces agissant sur la pale, dans le repère de cette dernière. Le but de ce rapport étant une étude structurelle, la force F_T fournissant l'énergie et ne chargeant pas la structure ne sera plus abordée par la suite.

En projetant la force axiale obtenue ans l'équation (9) dans le repère de la pale:

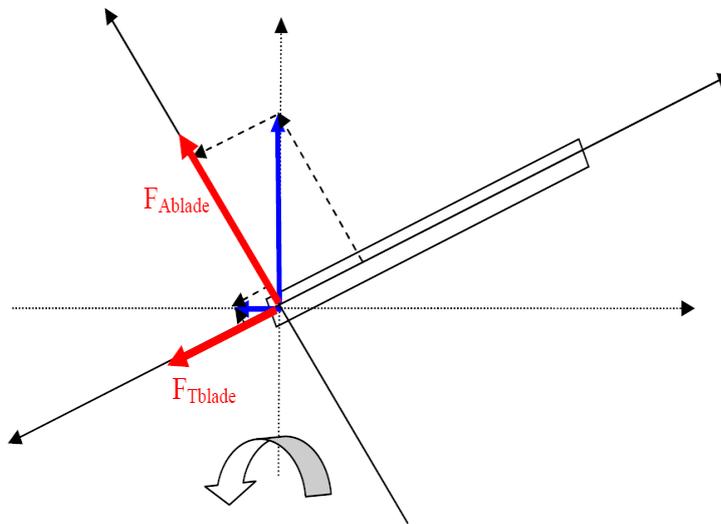


Figure 2.18: Forces axiale et tangentielle dans le référentiel de la pale

$$\begin{aligned} F_{Tblade}(r, z) &= (F_L(r, z) \cdot \sin \theta(r) - F_D(r, z) \cdot \cos \theta(r)) \cdot \sin(i(r)) \\ F_{ablade}(r, z) &= (F_L(r, z) \cdot \sin \theta(r) - F_D(r, z) \cdot \cos \theta(r)) \cdot \cos(i(r)) \end{aligned} \quad (12)$$

La résultante de ces deux forces peut être décomposée en une composante axiale et une autre tangentielle. La composante axiale par unité de longueur est donnée par :

$$f_T = \frac{\rho \cdot dS}{2} \cdot V_{rel}^2 \cdot [C_L(\alpha) \cdot \cos(\varnothing) + C_D(\alpha) \cdot \sin(\varnothing)] \quad (13)$$

2.12.4. Vitesse Induite

Comme il a été vu précédemment, le facteur d'induction axiale décrit la réduction de vitesse du flux incident due aux hautes pressions régnant en amont du rotor. L'énergie est extraite par un couple. Le vent exerce un couple sur l'éolienne; la poussée est un sous-produit nécessaire du couple. Les règles de la physique newtonienne stipulent que pour chaque action il existe une réaction égale. Si le vent exerce un couple sur les pales alors les pales doivent exercer un couple sur le vent. Ainsi, cette réaction va impliquer la rotation du flux d'air à l'arrière du rotor. Le flux dans le sillon aura donc 2 composantes, axiales et tangentielles. Le flux tangentiel est connu comme rotation du sillon. Le facteur d'induction tangentielle a' doit être introduit pour prendre en compte la rotation relative du sillon par rapport à la pale.

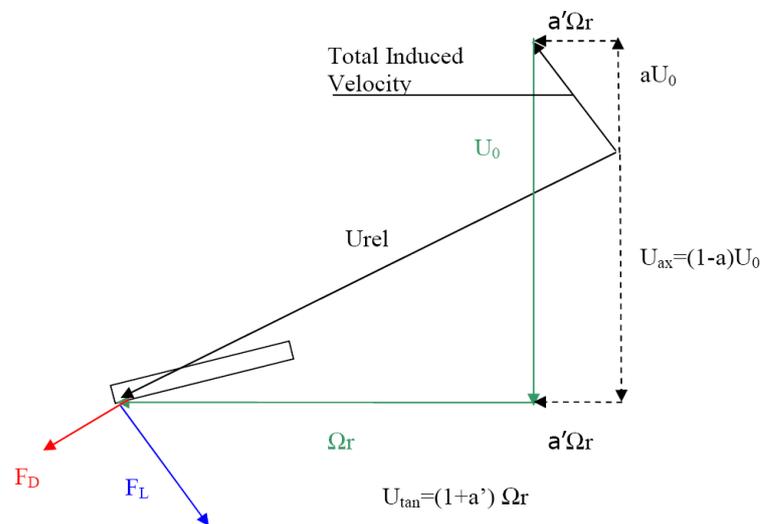


Figure 2.19: Triangle des vitesses

En vue d'augmenter l'énergie extraite, il nous faut augmenter le couple exercé sur l'arbre. Pour ce faire, la vitesse du vent incident doit augmenter. La vitesse de rotation des pales va alors croître dans les mêmes proportions, impliquant une rotation plus rapide du sillon. De ce point de vue, l'énergie dépensée pour permettre au sillon de tourner et de l'énergie qui ne sera pas transformée en électricité. On peut alors considérer que la rotation du sillon est une perte sur le plan énergétique. Le facteur d'induction tangentielle est une fonction de l'abscisse de la pale.

Finalement:

$$\begin{cases} U_{ax} = (1 - a)U_0 \\ U_{tan} = (1 + a')\Omega r \end{cases} \text{ et } \begin{cases} U_{ax\infty} = (1 - 2a)U_1 \\ U_{tan\infty} = (1 + 2a')\Omega r \end{cases} \quad (14)$$

2.12.5. Effet d'extrémité et déflexion de l'écoulement

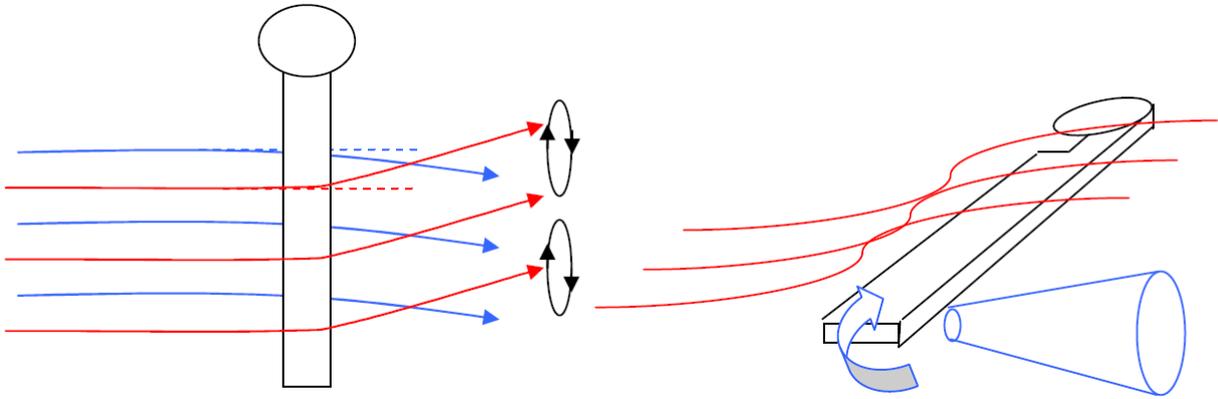


Figure 2.20: Schéma d'écoulement

Considérons maintenant l'écoulement de l'air vis à vis d'une pale en 3 dimensions, c'est à dire en considérant une pale de longueur finie. Quand la pale est soumise à une force de portance, la pression sur sa face inférieure est plus importante que sur sa face supérieure. Cette différence de pression entraîne la création d'un écoulement d'air du dessous de l'aile vers le dessus, passant par l'extrémité de la pale et impliquant une perte de portance local.

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

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

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

$$F = \frac{2}{\pi} \text{ACOS} \left(\exp \left(- \frac{B(R-r)}{2r \sin \theta} \right) \right) \tag{15}$$

F(R)=0 and F(0)=1

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

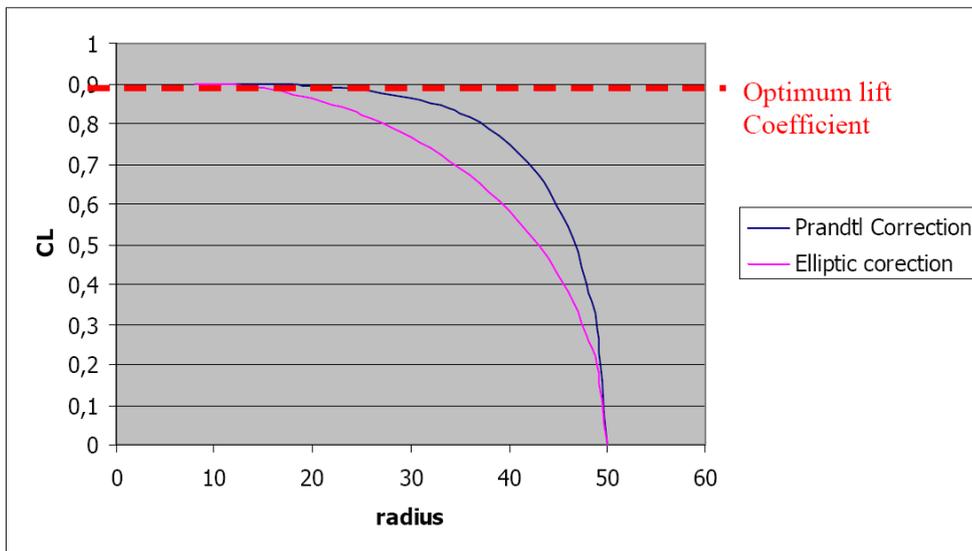


Figure 2.21: Correction du coefficient de portance

La correction elliptique est indépendante de la position azimutale de la pale. En revanche, à la vue de l'équation (12), on peut remarquer que la correction de Prandtl prend en compte la variation d'angle d'attaque et donc la position azimutale de la pale.

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

Une autre conséquence des vortex de bout de pale est la création d'une composante de vitesse parallèle au vent incident. Cette composante est connue sous le nom de « downwash velocity » (vitesse

de déflexion). Sa présence implique que la vitesse relative U_{rel} est déviée d'un angle η appelé angle d'incidence induit. Ceci implique que les forces de portance et de trainée s'appliquant sur la pale sont aussi déviées d'un angle η . Pour des raisons de simplicité, il est plus aisé de travailler sans considérer l'influence de l'angle induit dans la direction des vecteurs forces et d'introduire une composante de trainée supplémentaire venant s'ajouter aux composantes déjà existantes : Trainée de forme et trainée de pression. Il peut être démontré que:

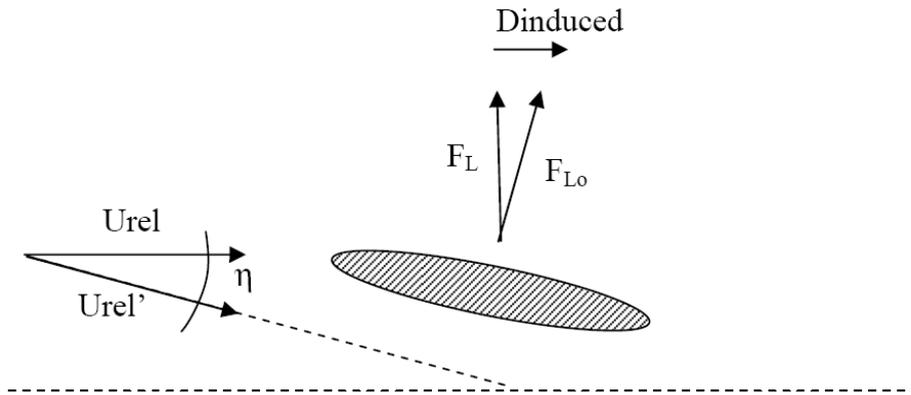


Figure 2.22: Vitesse induite

$$C_{DI} = \frac{cC_L^2}{2R\pi} \tag{16}$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \theta}{\sigma F C_L \cos \theta} + 1} \\ a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \theta}{\sigma F C_L} - 1} \end{array} \right. \quad \text{Où } \sigma = \frac{c \cdot B}{2\pi \cdot r} \tag{17}$$

2.13. Zones de fonctionnement de l'éolienne :

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

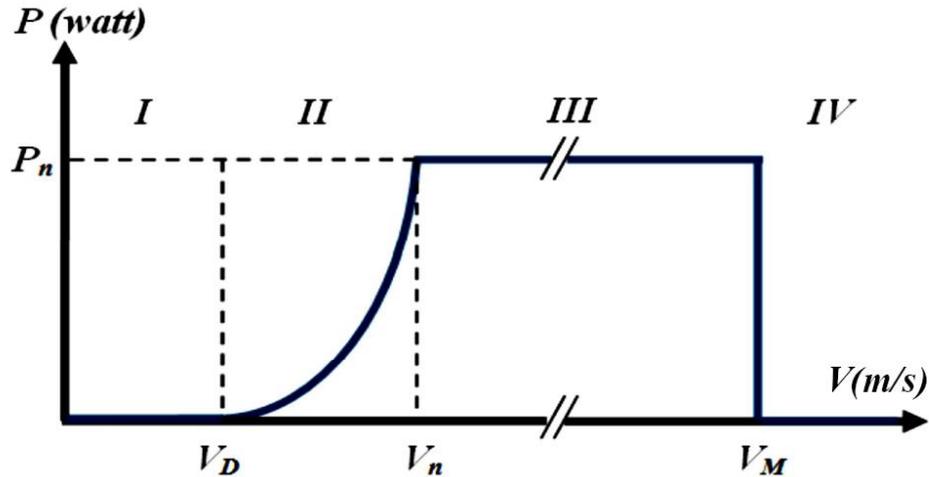


Figure2.23: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

V_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_D varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_n varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies ;

V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_M vaut 25m/s.

Zone I : $V < V_D$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_D < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $V_n < V < V_M$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge. Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. La première est une technique

active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure. La seconde technique est passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées. La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.

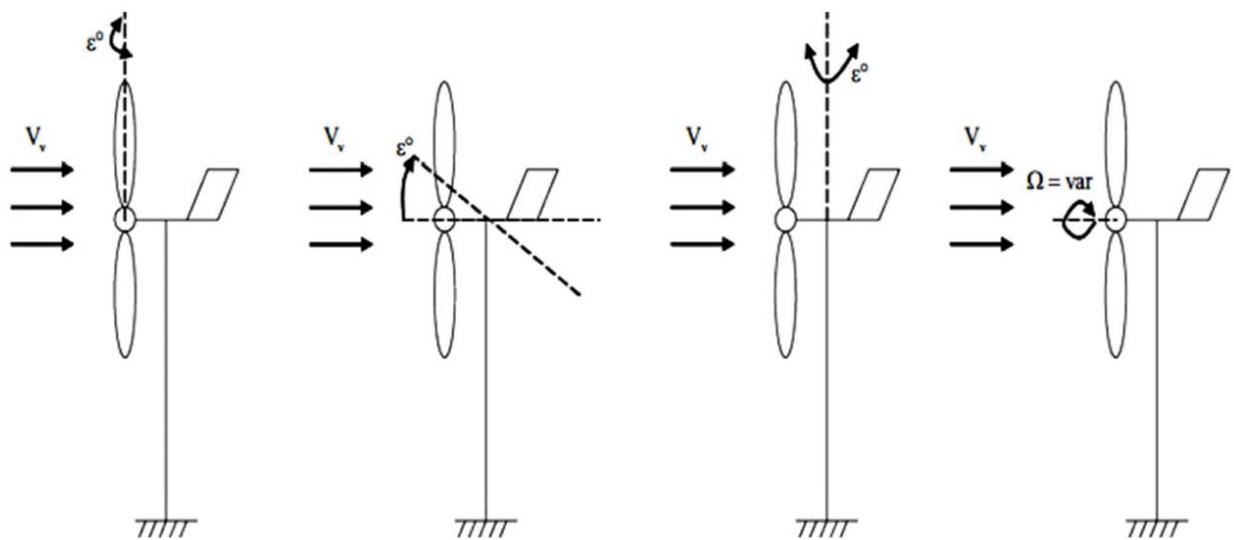


Figure 2.24 : Limitation de puissance éolienne, a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de Rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continûment Variable.

2.14. Eolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable

Face au problème de la source d'énergie aléatoire, deux approches sont possibles (Fig. 2.18) : la Génération à Vitesse Constante (GVC, cas A), et la Génération à Vitesse Variable (GVV, cas B). Dans le premier cas (GVC) une machine génératrice classique est directement connectée au réseau, et donc la plage de vitesse possible reste limitée aux alentours de la vitesse synchrone, qui est constante et imposée par le réseau.

Pour pouvoir profiter de toute la source d'énergie variable dans le cas de la GVC on doit utiliser un compensateur mécanique qui adapte le rapport de vitesse entre le système physique et l'axe du générateur en fonction de la disponibilité énergétique du moment. Cette compensation ou adaptation est

faite « à la base », en éliminant une partie de l'énergie disponible au prix de la diminution du rendement global du système.

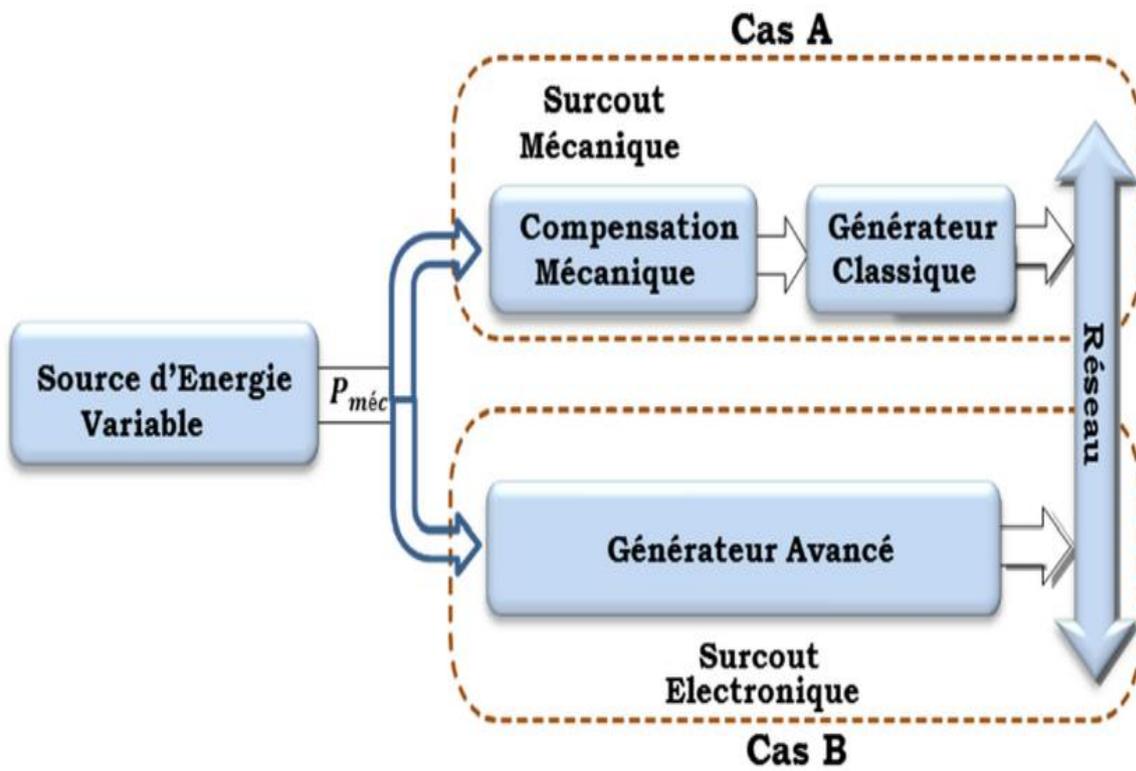


Figure 2.25: Systèmes de génération d'énergie électrique à partir de sources d'énergie variable

**Chapitre III:
Calcul des efforts
aérodynamiques
agissant sur les pales s d'une
éolienne**

3.1. Introduction

La conception d'un aérogénérateur repose essentiellement sur les théories aérodynamiques; car cette machine utilise des pales caractérisées par une géométrie spéciale ayant un profil aérodynamique. Le dimensionnement de cette forme géométrique a un grand impact sur son rendement énergétique et par conséquent sur sa rentabilité économique.

Pour les petites éoliennes, où le coût du kilowatt reste encore élevé et le site d'implantation est généralement imposé, la modélisation aérodynamique prend une importance particulière. Des calculs très poussés doivent être menés dans le but de déterminer les différents paramètres de la pale, comme les distributions de la longueur de sa corde, l'angle de vrillage ainsi que l'épaisseur le long de cette pale.

La modélisation aérodynamique de la pale est une tâche complexe, cette complexité est due à son mouvement rotatif qui crée un écoulement tridimensionnel de l'air autour de cette pale. Cette modélisation a pour objectif de déterminer les paramètres optimaux de la pale (permettant de capter une puissance maximale) et ensuite de calculer les efforts aérodynamiques agissant sur les pales ainsi que la puissance captée.

Ce calcul, qui permet de déterminer les efforts aérodynamiques, est nécessaire aussi bien pour estimer les performances énergétiques de l'aérogénérateur, que pour prévoir les problèmes de structure.

Pour rendre cette modélisation possible, plusieurs simplifications sont à envisager. En effet, deux théories sont combinées, la première théorie est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory). Dans cette approche, un modèle unidimensionnel est utilisé pour exprimer l'énergie extraite du vent, en supposant que l'air est incompressible. La deuxième est la théorie de l'élément de la pale (blade élément théorie), qui tient compte de la composante de rotation de l'air due à la rotation des pales.

Si la première théorie ne peut pas révéler seule les informations nécessaires pour dimensionner les pales, sa combinaison avec la deuxième théorie permet d'avoir tous les renseignements utiles.

La méthode de calcul développée est basée sur la solution simultanée des équations des efforts et des couples, obtenues par les deux théories.

Dans cette méthode, on commence par donner des valeurs initiales (arbitraire) aux facteurs d'interférences axial et tangentiel. Ces deux facteurs permettront de déterminer l'angle d'écoulement de l'air ainsi que les deux efforts aérodynamiques axial et tangentiel. Ces paramètres permettront à leur tour de calculer de nouveau les deux facteurs d'interférences.

Les étapes de calcul précédentes seront répétées suivant une approche itérative jusqu'à convergence entre les anciennes et les nouvelles valeurs des facteurs d'interférences.

Une formulation détaillée des deux théories est présentée dans les paragraphes suivants.

3.2. Théories aérodynamiques

Dans ce travail, deux théories sont utilisées d'une manière combinée, la première théorie est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory). Dans cette approche, un modèle unidimensionnel est utilisé pour exprimer l'énergie extraite du vent, en supposant que l'air est incompressible.

La deuxième est la théorie de l'élément de la pale (blade element theory), qui tient compte de la composante de rotation de l'air due à la rotation des pales.

3.2.1 Théorie de l'écoulement axial (the axial momentum theory)

Dans cette théorie les suppositions suivantes sont faites:

- L'écoulement est totalement axial (l'air ne subit aucun mouvement de rotation).
- L'écoulement est incompressible.
- La vitesse du vent est constante loin du plan du rotor.

L'écoulement est rotationnellement symétrique.

L'air passe à travers le rotor sans frottement.

En appliquant le principe de la conservation de masse, on obtient:

$$V_0 A_0 = V A = V_1 A_1 = V_i A_i \quad (3.1)$$

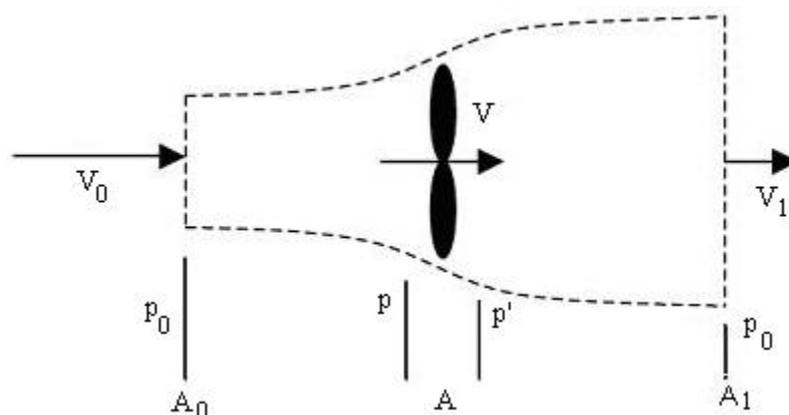


Figure 3.1: Ecoulement axial de l'air

Calculs des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une petite éolienne 243 où: V_i est la vitesse de l'air à la station i ; A_i est l'aire de la section du flux d'air à la station i .

Aussi en appliquant le théorème de variation de la quantité de mouvement, la force axiale du vent sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

$$T = m (V_0 - V_1) = \rho A V (V_0 - V_1) \quad (3.2)$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.3)$$

et celle en aval :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p' + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.4)$$

En combinant (4) et (5), on obtient :

$$p - p' = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2) \quad (3.5)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} T &= A (p - p') \\ T &= \frac{1}{2} A \rho (V_0^2 - V_1^2) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Les deux équations (2) et (5) permettent d'écrire :

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (3.7)$$

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

$$P = \frac{1}{2} m (V_0^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} \rho V A (V_0^2 - V_1^2) \quad (3.8)$$

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

$$C_p = \frac{P}{(1/2) \rho V_0^3 A} \quad (3.9)$$

Introduisant le facteur d'interférence axial a , défini comme la fraction de diminution de la vitesse du vent, entre celle de l'écoulement libre en amont du rotor et celle traversant le plan du rotor

$$V = (1 - a) V_0 \quad (3.10)$$

En utilisant l'équation :

$$V_1 = (1 - 2a) V_0 \quad (3.11)$$

En substituant V_1 et v dans (5), on obtient :

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \rho A V_0^2 4 a (1 - a) \\ P &= \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4 a (1 - a)^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

L'expression de C_p devient :

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3.13)$$

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

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

$$\text{Cela donne :} \quad a = 1/3$$

$$C_p = \frac{16}{27} \approx 0,59259 \quad (3.14)$$

Le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement 59,3 %. Dans la pratique, ce rendement n'est jamais réalisé à cause des effets suivants:

- L'écoulement de l'air a une composante rotative due à la rotation du rotor.
- La force de traînée n'est jamais nulle à cause des frottements.
- L'hélice contient un nombre fini de pales.

Ce modèle simple unidimensionnel ne décrit pas l'écoulement rotatif de l'air, cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes.

Pour que l'hélice extraie l'énergie du vent, la vitesse de ce dernier doit diminuer lorsqu'il traverse l'hélice. Une machine idéale doit ralentir la vitesse du vent de $2/3$.

D'après l'équation de continuité (1), la section de l'air balayé par le vent diminue de l'amont vers l'aval. Pour une éolienne idéale, l'aire de la section de l'écoulement à l'amont est de $2/3$ celui du rotor, et ce dernier est la moitié de celui de la section en aval. Finalement, l'extraction de toute l'énergie disponible du vent est pratiquement impossible, dans la pratique, le rendement des éoliennes ne dépasse pas les 45 %.

3.1.2 Théorie de l'élément de pale

Dans le modèle précédent, on a supposé que l'écoulement ne subit aucun mouvement de rotation, mais en réalité la loi de conservation du moment cinétique impose que l'air doit avoir un mouvement rotatif afin que le rotor puisse extraire un couple utile. Dans ce cas, le sens de rotation de l'écoulement de l'air est opposé à celui du rotor.

L'introduction du mouvement de rotation de l'air permet à ce modèle de mieux approcher la réalité et d'obtenir des résultats plus fiables. Dans l'élaboration de ce modèle, les suppositions suivantes sont envisagées:

L'écoulement en amont loin du plan du rotor, est complètement axial. Au niveau du plan du rotor, la vitesse angulaire de rotation de l'air est ω , cette vitesse diminue considérablement loin du rotor, en aval, de telle manière que la pression statique à cet endroit peut être considérée égale à la pression atmosphérique.

Il n'y a pas d'interférence entre les éléments adjacents de la pale.

L'écoulement de l'air autour d'un élément de la pale est considéré comme bidimensionnel.

Les expressions de la puissance extraite et du couple appliqué sur les pales, peuvent être obtenues en considérant l'écoulement de l'air à travers un élément annulaire de rayon r , d'épaisseur dr et de section dA (Fig. 3.2).

$$dT = 4 a (1 - a) \rho V_0^2 \pi r dr \tag{3.15}$$

La force axiale élémentaire est déduite de l'équation (11), en remplaçant la surface A du rotor par la section de l'élément annulaire dA on obtient dans ce cas :

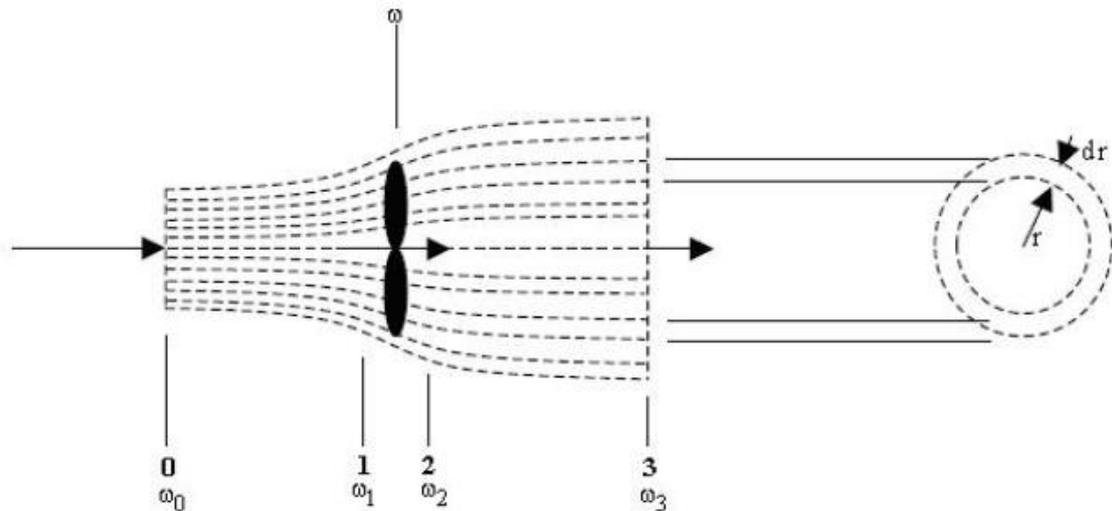


Figure 3.2: Ecoulement de l'air à travers un élément annulaire

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

$$dF_t = m dV_t = \rho V dA \omega r \tag{3.15}$$

$$dF_t = 2 \pi \rho V \omega r^2 dr \tag{3.16}$$

Le couple généré dans la section annulaire est :

$$dQ = 2 \pi \rho V \omega r^3 dr \tag{3.17}$$

Puisque la puissance est :

$$P = Q \Omega$$

La puissance élémentaire extraite à travers la section annulaire est :

$$dP = 2\pi\rho V\omega r^3 dr \quad (3.18)$$

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

$$Q = 2\pi\rho \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (3.19)$$

$$P = 2\pi\rho\Omega \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (3.20)$$

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

$$\omega = a' \Omega \quad (3.21)$$

Puisque l'écoulement de l'air en amont, loin du rotor est purement axial, on a : $\omega = 0$.

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

$$\omega_0 r_0^2 = \omega_1 r_1^2 \quad (3.22)$$

Cela implique que : $\omega = 0$.

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

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

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (3.23)$$

Donc :

$$\omega_2 = 2 \Omega a' \tag{3.24}$$

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

$$\omega_2 I_2^2 = \omega_3 I_3^2 \tag{3.25}$$

Etant donné que : $I_1 \approx I_2 \approx I$

L'équation (25) devient :

$$\omega_2 r^2 = \omega_3 I_3^2 \tag{3.26}$$

Donc:

$$\omega_3 = \omega_2 \left(\frac{r}{I_3} \right)^2 \tag{3.27}$$

$$\omega_3 = 2 \Omega a' \left(\frac{r}{I_3} \right)^2 \tag{3.28}$$

Puisque le rayon du sillage croît en s'éloignant du rotor vers l'aval, l'équation (28) montre que la vitesse de rotation de l'air diminue plus rapidement en s'éloignant dans le même sens. Cela confirme la deuxième supposition citée ci-dessus.

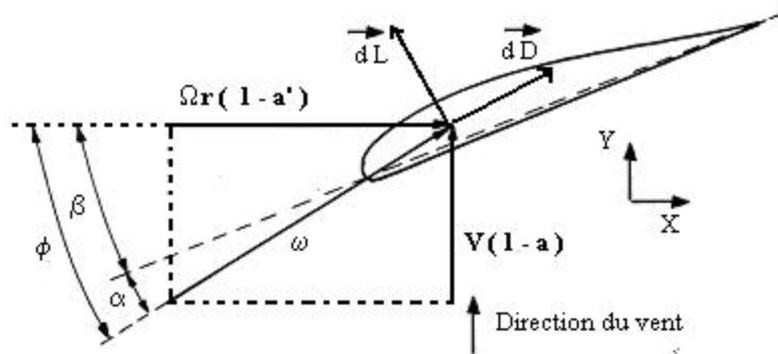


Figure 3.3: Section d'un élément de la pale à un rayon r

Soit \$W\$ est la vitesse relative de l'air,

$$dq = \frac{1}{2} \rho W^2 dA = \frac{1}{2} \rho W^2 \quad (3.29)$$

On a :

$$C_L = \frac{dL}{dq} \quad (3.30)$$

$$C_D = \frac{dD}{dq} \quad (3.31)$$

L: la force de portance; D : la force de traînée; C_L : le coefficient de portance; C_D : le coefficient de traînée.

$$C_x = \frac{dF_x}{dq} \quad (3.32)$$

$$C_y = \frac{dF_y}{dq} \quad (3.33)$$

dF_x est la force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale, et dF_y la force axiale élémentaire qui s'exerce également sur une seule pale.

D'après la figure 3, on peut écrire :

$$C_y = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (3.35)$$

$$C_x = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (3.36)$$

On a :

$$dF_t = B \cdot dF_x \quad (3.37)$$

$$dT = B \cdot dF_y \quad (3.38)$$

où B est le nombre de pales.

D'après la figure 3, on a :

$$\alpha = \phi - \beta \quad (3.39)$$

$$\tan \phi = \frac{(1 - a) V_0}{(1 + a') \Omega r} \quad (3.40)$$

Où :

α : est l'angle d'attaque (d'incidence)

β ; est l'angle de vrillage.

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

$$dT = B C_y dq = B C_y \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (3.41)$$

$$dQ = B C_x dq r = B C_x \frac{1}{2} \rho W^2 c r dr \quad (3.42)$$

L'égalité de l'équation (3.14) avec (3.38) et celle de l'équation (3.17) avec (3.39) donne :

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{c B C_y}{8 \pi r \sin^2 \phi} \quad (3.43)$$

$$\frac{a'}{1 + a'} = \frac{c B C_x}{8 \pi r \sin \phi \cos \phi} \quad (3.44)$$

D'après la figure 3, on a :

$$W = \frac{V}{\sin \phi} = \frac{V_0 (1 - a)}{\sin \phi} \quad (3.45)$$

Aussi :

$$W = \frac{\Omega r (1 + a')}{\cos \phi} \quad (3.46)$$

Le coefficient de plénitude local (local solidity) est défini comme suit

$$\sigma = \frac{c B}{2 \pi r} \quad (3.47)$$

La résolution des deux équations (3.40) et (3.41), donne les expressions de a et de a' respectivement :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_y} + 1} \quad (3.48)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_r} + 1} \quad (3.49)$$

Remarque

Certains auteurs affirment que le coefficient de traînée doit être omis des équations (34) et (35), cela est justifié par le fait que certains paramètres comme la force axiale, ainsi que la puissance ont été calculés par la première théorie (la théorie axiale) sans tenir compte des frictions, l'égalité de ces expressions obtenues par les deux théories oblige à prendre $C_d = 0$

Par contre, d'autres auteurs continuent à inclure le terme de la traînée. Sachant qu'avec un nombre fini de pales, la supposition que l'écoulement est rotationnellement symétrique ne tient pas évidemment.

Cela a un effet sur la performance énergétique qui engendre des pertes de performance concentrées au niveau de la pointe (le bout libre) de la pale. Ces pertes sont connues sous le nom 'tip losses'.

Ce phénomène est quantifié par le facteur de réduction de la circulation proposé par Prandtl et défini par la formule suivante :

$$F = \frac{B \Gamma}{\Gamma_\infty} = \frac{2}{\pi a r \cos(e^{-f})} \quad (3.50)$$

Avec:

$$f = \frac{(B/2)(R - r)}{r \sin \phi} \quad (3.51)$$

Γ est la circulation effective de la pale au rayon r . Γ_∞ est la circulation d'une hélice ayant un nombre infini de pale. Les facteurs d'interférence, axial a et tangentiels a' de la vitesse du vent deviennent :

$$a = \frac{1}{\frac{4 F \sin^2 \phi}{\sigma C_y} + 1} \quad (3.52)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_x} - 1} \quad (3.53)$$

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

3.2 Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale

Pour un élément annulaire de l'air de rayon r et d'épaisseur dr , on peut appliquer l'équation de Bernoulli pour déduire la différence élémentaire de pression à travers la section annulaire des pales, sachant que lorsqu'on traverse l'hélice la vitesse angulaire relative de l'air croît Ω de Ω à $\Omega + \omega_2$, alors que la vitesse axiale reste inchangée:

$$p + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 = p' + \frac{1}{2} \rho (\Omega + \omega_2)^2 r^2 \quad (3.54)$$

$$p - p' = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 \quad (3.55)$$

La force axiale sur l'élément annulaire du rotor est :

$$dT = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 2 \pi r dr \quad (3.56)$$

Introduisant le facteur d'interférence tangentiel a' , dont l'expression est donnée par l'équation (24) :

$$a' = \frac{\omega_2}{2 \Omega} \quad (3.57)$$

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

$$dT = 4 a' (1 + a') \rho \Omega^2 r^2 \pi r dr \quad (3.58)$$

La division des deux équations (14) et (53) peut donner :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{V_0^2} \quad (3.59)$$

Prenant la vitesse spécifique (tip speed ratio) comme :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0} \quad (3.60)$$

et la vitesse spécifique locale comme

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_0} \quad (3.61)$$

L'équation (54) devient :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \lambda_r^2 \quad (3.62)$$

L'expression de la puissance extraite dans l'équation (20) peut s'écrire :

$$P = 2\pi\rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (3.63)$$

L'expression de la puissance extraite dans l'équation (20) peut s'écrire :

$$P = 2\pi\rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (3.64)$$

Ou bien :

$$P = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V_0^3 \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (3.65)$$

Le coefficient C_p de puissance est formulé comme suit :

$$C_p = \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (3.66)$$

Le coefficient de puissance dépend du facteur K , tel que :

$$K = a'(1 - a) \quad (3.67)$$

Ce coefficient atteint sa valeur maximale $C_{P \max}$ si l'expression K est maximale.

Les deux équations (55) et (59) permettent d'exprimer K en fonction de a . Le maximum de K est atteint si, on prend :

$$\frac{\partial K}{\partial a} = 0 \quad (3.68)$$

Cela implique :

$$\frac{(1 - a)(4a - 1)^2}{(1 - 3a)} = \lambda_r^2 \quad (3.69)$$

L'égalité des deux équations (55) et (61) permet d'écrire :

$$a' = \frac{(1 - 3a)}{(4a - 1)} \quad (3.70)$$

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

3.2.1 Calcul de la forme optimale de la pale

La conception d'une forme optimale de la pale d'une hélice implique que la dernière relation (62), correspondante à une puissance maximale, soit satisfaite. Si on adopte la thèse de négliger les frottements dans le sens axial, en prenant $C_D = 0$, l'expression de a de l'équation (45) devient :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_L \cos \phi} + 1} \quad (3.71)$$

Aussi, l'expression de a' de l'équation (46) devient :

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L} - 1} \quad (3.72)$$

L'égalité des deux expressions de dans les équations (63) et (65) donne l'équation quadratique suivante, dont l'inconnue est σC_L :

$$(\sigma C_L)^2 + 8 \cos \phi \sigma C_L - 16 \sin^2 \phi = 0 \quad (3.73)$$

Cette équation admet deux solutions :

$$\sigma C_L = -4 (\cos \phi + 1) \quad (3.74)$$

$$\sigma C_L = 4 (1 - \cos \phi) \quad (3.75)$$

La première racine n'est pas acceptable, car $\sigma C_L < 0$. La deuxième racine donnée par (68) donne l'expression optimale de la corde, le long de la pale :

$$C = \frac{8 \pi r}{B C_L} (1 - \cos \phi) \quad (3.76)$$

Pour déterminer l'angle optimal ϕ et par conséquent l'angle optimal de vrillage β , des transformations similaires sont à envisager. La formule (37) peut s'écrire comme suit :

$$\tan \phi = \frac{(1 - a)}{(1 + a')} \frac{1}{\lambda_r} \quad (3.76)$$

Si on substitue l'expression (62) dans cette dernière l'équation, on obtient :

$$\lambda_r = \frac{(4a - 1)(1 - a)}{a} \frac{1}{\tan \phi} \quad (3.77)$$

La substitution de l'équation (63) dans (71) donne :

$$\lambda_r = \frac{(2 \cos \phi - 1)(1 + \cos \phi)}{(1 + 2 \cos \phi) \sin \phi} \quad (3.78)$$

Cette équation est simplifiée comme suit :

$$\lambda_r = \frac{\cos \phi + \cos 2 \phi}{\sin \phi + \sin 2 \phi} \quad (3.80)$$

D'où :

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2} \phi} \quad (3.81)$$

On aboutit finalement à :

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (3.82)$$

On déduit l'angle optimal de vrillage β de l'équation (36) :

$$\beta = \phi - \alpha_{opt} \quad (3.83)$$

Où :

α_{opt} : est l'angle d'attaque optimale qui donne $\left(\frac{c_l}{c_d} \right)_{max}$

Chapitre IV

modélisation d'une pale d'éolienne

Conception de la pale d'éolienne Les pales sont en général composées de pieds cylindriques et de corps de forme aérodynamique fonctionnel et d'une extrémité comme illustré sur la Figure(01). La section cylindrique est située à proximité du pied de pale, et permet de fixer la pale au moyeu (encastrement). La pale est renforcée à l'intérieur pour lui donner une certaine rigidité et assurer le maintien de sa forme pendant le fonctionnement. La détermination des paramètres aérodynamiques qui sont les largeurs de la pale, l'angle d'attaque doivent assurer la meilleure performance. Il faut aussi choisir un profil pour la pale tels qu'un profil NACA (Comité consultatif national de l'aéronautique) qui ont été historiquement utilisé pour la conception des pales jusqu'à les années 1980, ils présentent une faible traînée. D'autres profils sont élaborés et proposés dans d'autre laboratoires et instituts tels que National Renewable Energy Laboratory (NREL) des États-Unis, Delft Université de Technologie au Pays-Bas, Riso National Laboratory au Danemark, etc.

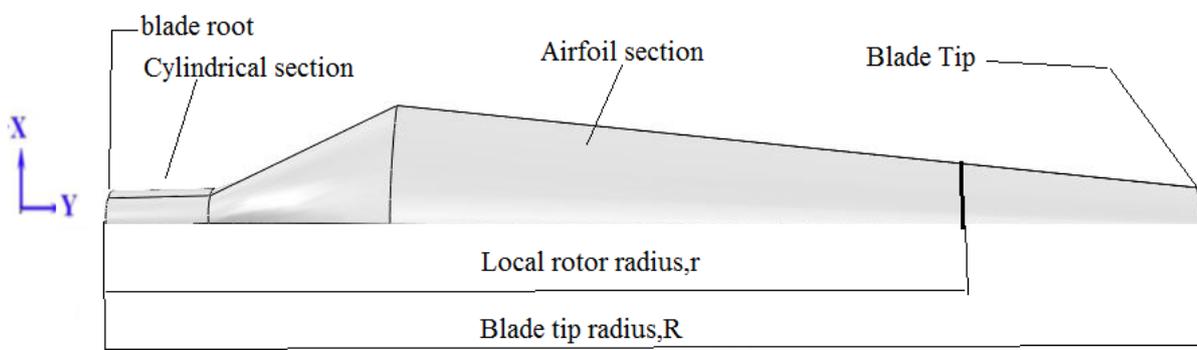


Figure 4.1 : Parties de pale d'éolienne

4.1. Géométrie des pales

La configuration de base suppose l'éolienne tripale, la Figure(2) est une représentation graphique d'une forme en plan typique d'une pale, avec un cône linéaire à partir de l'emplacement corde maximum ($25\%r/R$) jusqu'à la pointe de la pale. Une racine de pale circulaire est située à ($5\%r/R$). La forme de la pale est supposée rester circulaire à ($7\%r/R$), avant de passer à une forme pure aile située à ($25\%r/R$).

La forme en plan de la pale pour la présente étude est la même que celle utilisée pour la conception du rotor de base, La dimension de corde maximale est de ($8\%R$), et les dimensions d'accords diminuent de manière linéaire à une valeur de R de $2,6\%$ à la pointe de la pale .

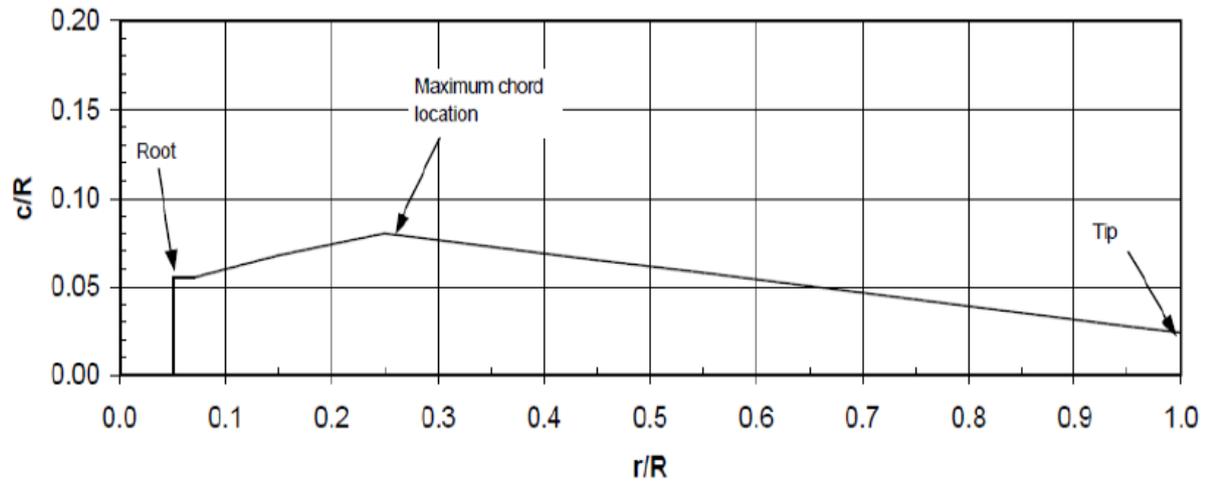


Figure 4.2: La forme en plan d'une pale typique.

Les profils utilisés pour les conceptions des pales structurelles dans cette étude sont de la famille de type NACA cinq chiffres. Toutefois, ces profils sont relativement minces pour de très longues pales, dans ce cas les constructeurs de pales utilisent près du pied des profils plus épais offrant une meilleure résistance mécanique. D'autre part, pour corriger les paramètres aérodynamiques des pales par la considération de la théorie tourbillonnaire de Glauert un programme en Matlab est nécessaire, Les modifications de forme et l'emplacement des profils le long de la pale par logiciel SolidWorks sont illustrés sur la Figure (3), suivante.

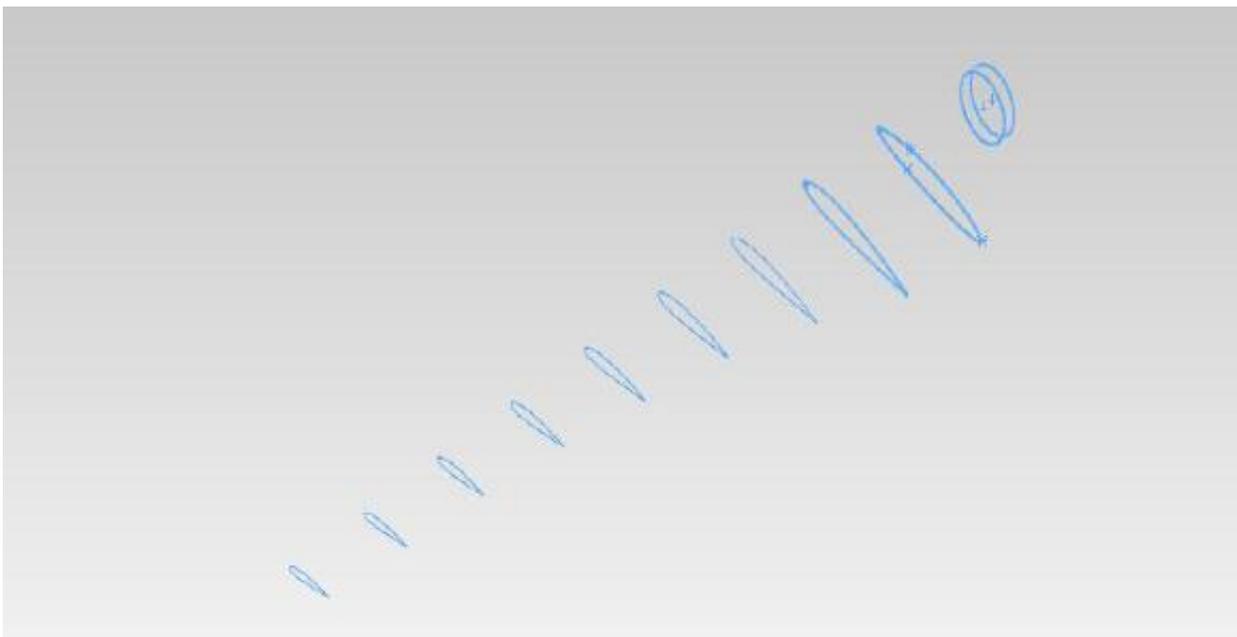


Figure 4.3 : Profil de type NACA23015 utilisée pour la pale

4.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est exigeante en temps de calcul puisque les pales sont des structures vides faites de peaux minces, des éléments finis de type coque (Shell) sont généralement utilisés. Ces éléments sont bien adaptés pour modéliser les empilements de composite dont sont faites les pales. Certains logiciels ont développés de modèles d'éléments finis pour les pales d'éoliennes. Ce qui permet de définir, dans une interface graphique, les paramètres géométriques (profils aérodynamiques, distribution de corde et de gauchissement,), les matériaux, génération de maillage de la pale ...

La modélisation des conditions aux limites en déplacement ne pose généralement pas de problèmes : les nœuds de la racine de la pale sont simplement bloqués. L'application des chargements gravitationnels et inertiels se fait aussi facilement par la définition de forces de volume. Les chargements aérodynamiques sont quant à eux plus difficiles à définir, variant autant dans la direction longitudinale de la pale que dans la direction de la corde. Il s'agit en effet d'une distribution complexe de pressions et de frottements sur la surface de la pale. Certains auteurs choisissent de ne tenir compte que de la variation longitudinale des charges (Berggreen et coll, 2007) tandis que d'autres considèrent aussi une variation dans le sens de la corde, mais en supposant une distribution donnée de la pression (McKittrick et coll, 2001). Certains ont plutôt choisi d'utiliser directement la répartition de pression obtenue d'une analyse aérodynamique de la pale figure (4)

La conception de structures à l'aide de la méthode des éléments finis se fait habituellement par un processus itératif manuel : la structure est analysée puis le concepteur modifie la géométrie, les matériaux ou, dans le cas d'une structure en composite, la définition des laminés de manière à respecter les critères de conception. Ces critères peuvent être la résistance mécanique, la stabilité de la structure (flambage), les fréquences propres ou la déformée. Berggreen et coll. (2007)

Les variables de conception sont l'épaisseur des coques des surfaces aérodynamiques, l'épaisseur des âmes et le positionnement des nervures.

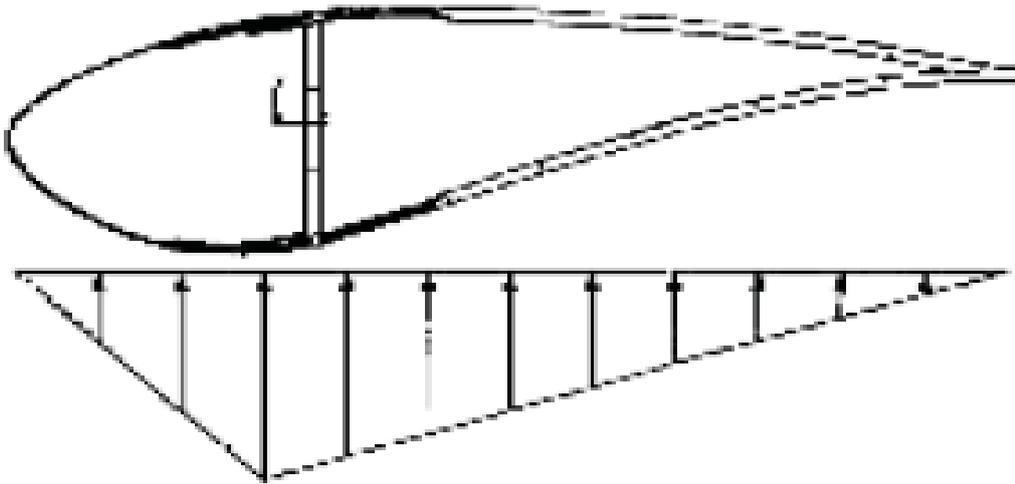


Figure 4.4: Approximation par une répartition bi-linéaire

4.3 Analyses statique de la pale

4.3.1. type de sollicitation

Les trois rotations et trois déplacements sont nulle à la racine de la pale. La portance et les forces de traînée sont fonction de la vitesse du vent. Leur maximum se produit généralement à la vitesse nominale du vent (12-15 m / sec). Le composant de forces $Z(dPz)$ résultant de forces de portance et de forces de traînée est appliqué à la surface inférieure de la pale, et le composant $Y(dPy)$ est appliquée à la fois aux surfaces inférieure et supérieure Figure(5) .

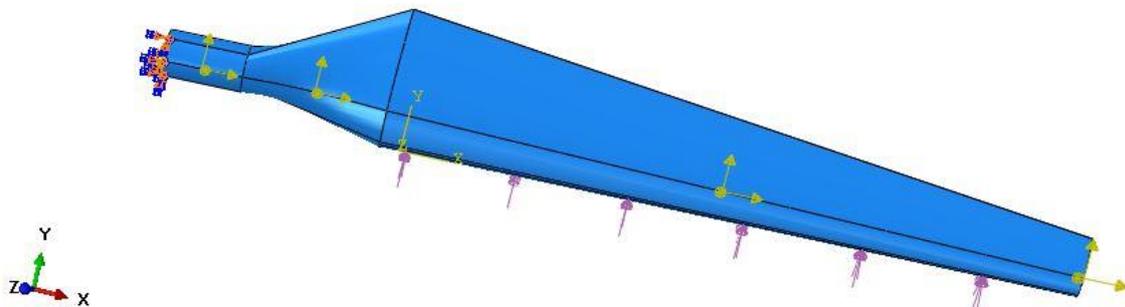


Figure 4.5 : conditions aux limites (l'analyse statique d'une pale)

4.3.2. Les forces appliquées

Les forces s'exerçant sur une pale se résument comme suit :

La force de portance à une vitesse relative du vent résultant (W) donnée par

$$P = \frac{1}{2} \rho(\text{air}) W^2 C_z l c$$

La force de trainée à une vitesse relative du vent résultant (W) donnée par :

$$P = \frac{1}{2} \rho(\text{air}) W^2 C_x l c$$

Où C : corde, ρ_{air} : densité d'air, C_z et C_x coefficient de portance et de trainée, l : longueur d'élément de pale.

L'expression de la force centrifuge donnée par la formule

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot R_{fc} \quad \text{et} \quad m = \frac{\rho}{V} \rightarrow F_c = \frac{\rho}{V} \omega^2 R_{fc}$$

m : la masse du volume étudié ; ω : la vitesse de rotation ; V : volume

R_{fc} : Rayon du centre de gravité du volume concernée

3-Poussée axial est donnée par la formule

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

La puissance est maximale pour $V_2 = v_3/3$ donc

$$F_{axi} = \frac{4}{9} \rho \cdot S \cdot V_1^2$$

$$S = \pi \cdot r^2 \quad \text{donc} \quad F_{axi} = \frac{4}{9} \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot V_1^2$$

4.3.3. Détermination des forces subit par un élément de pale

Les données

Angle d'incidence $i = 5^\circ$

- Module de Young $E = 78 \times 10^9$ Gpa
- Coefficient de poisson $\nu = 0.23$
- Coefficient de portance $C_z = 0,736$ dans le cas d'un vent normale
- Coefficient de trainée $C_x = 0,0045$
- Vitesse du vent $v = 6$ m /s
- Angle d'incidence $i = 30^\circ$
- Coefficient de portance $C_z = 0,7404$ dans le cas d'un vent de rafale
- Coefficient de trainée $C_x = 0,5094$
- Vitesse du vent $v = 11$ m /s
- Longueur de pale = 4 mètre
- Largeur de la pale après donnée par $l = 0,421 / \sqrt{36r^2 + 0,44}$
- Epaisseur du profil $e = 0,5$ l
- Vitesse angulaire $\omega = 36$ rad/s
- vitesse spécifique $\lambda_0 = 6$
- masse volumique de l'air $\rho_{air} = 1,25$ kg/m³
- Masse volumique du matériau composite $\rho_c = \rho_f V_f + (1 - V_f) \rho_m$
- Matériaux composite définit par :

Matrice d'époxy de masse volumique $\rho_m = 1900$ kg/m³

Renfort (E-glass) de tissu triaxial désigné de masse volumique et de fraction volumique successivement $\rho_f = 1750$ kg/m³ et $V_f = 0,4$

Donc la masse volumique du composite est $\rho_c = 1840$ kg/m³

4.4. Utilisation de l'outil d'Abaqus

Notre but est une analyse par éléments finis du comportement d'une pale sous ses sollicitations de fonctionnement. En d'autres termes, l'analyse prend en charge un modèle qui comprend des nœuds, des éléments, les propriétés des matériaux, des constantes réelles, les conditions aux limites, et d'autres caractéristiques qui sont utilisées pour représenter la pale. A cause de la forme complexe de la pale ont amené à utiliser l'outil d'Abaqus qui se caractérise par une interface similaire à une interface de CAO.

4.5. Spécification du problème

Dans ce travail, nous allons donner les étapes de le calcul structurelle d'une pale creuse d'un profil NACA 23015 à un angle d'attaque bien définit, la conception de la pale creux de longueur de 4 mètre se fait tou a bord par le logiciel de conception mécanique CAO SolidWork:

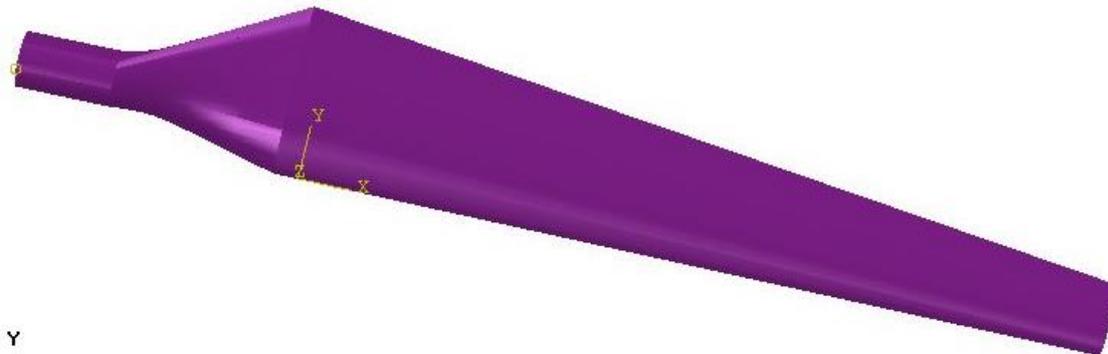


Figure 4.6 : pale creux de 4 mètre de longeurs par solidwork

Pour l'Utilisation de cette pale par **Abaqus**, il est nécessaire de sauvegarder le fichier (*.SLDPRT) en format *.IGS dans logiciel solidwork, ensuite, il est possible d'importer le fichier de la pale pour faire les calculs avec **Abaqus Static Mechanical**.

4.6. Conditions aux limites

Nous allons considérer que la pale et libre d'un côté (bout de pale) et encastrée a l'autre cote (pied de pale) et nous définissant la distribution de force normale perpendiculaire à la corde du profil comme indiquée le tableau-1

Tableau1 4.1 : les différentes forces appliquées sur pale

Les forces portance dans le cas de marche normale				
L	0.3	1.5	2	3
Pox	0.16	1.397	4.099	8.273
Poy	-1.83	-16.02	-46.992	-94.851
La force trainée dans le cas de marche normale				
	0.3	1.5	2	3
Tox	0.011	0.098	0.287	0.580
Toy	0.001	0.009	0.025	0.051
Les forces dans le cas de vent extrême				
L	0.3	1.5	2	3
	300	1500	2100	3000
Force centrifuge dans le cas de marche normale				

L	0.3	1.5	2	3
Fc	1.26	11.11	11.41	11.57
Les forces axiales				
	0.3	1.5	2	3
Fa	5.652	141.3	276.94	565.2

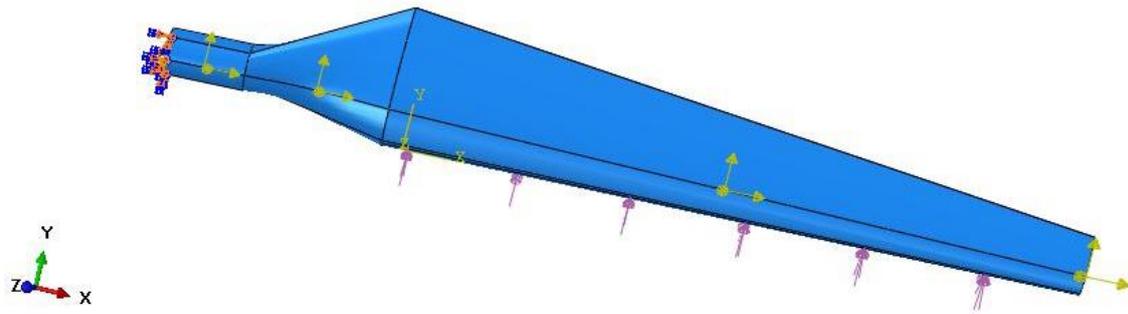


Figure 4.7 : l'application des charges et des conditions aux limites (l'analyse statique d'une pale)

4.7. Analyse structurelle statique

A ce niveau on introduit les conditions aux limites de la pale qui est l'encastrement d'un côté parallèle au plan XOY, l'autre côté est laissé libre avec l'application des chargements de toutes les forces sur toute la surface de l'extrados comme montre sur la figure qui suit :

4.8. Le maillage de la pale :

Le matériau utilisé pour la pale est une coque (Shell), on choisit la fonction de maillage automatique de la pale (par défaut), ceci est illustré sur la figure suivante :

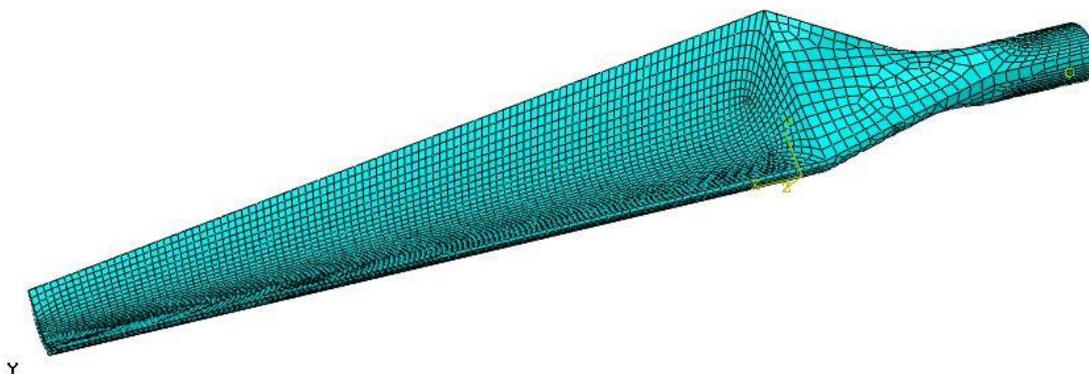


Figure 4.8: maillage de la pale par Abaqus

4.9. solutions de Cas de marche normale

4.9.1. Contraintes

A gauche est donné la distribution des contraintes en échelle colorée, alors qu'à droite est donnée l'évolution de la valeur de la contrainte le long de la pale.

Il est clair que la contrainte diminue le long de la pale.

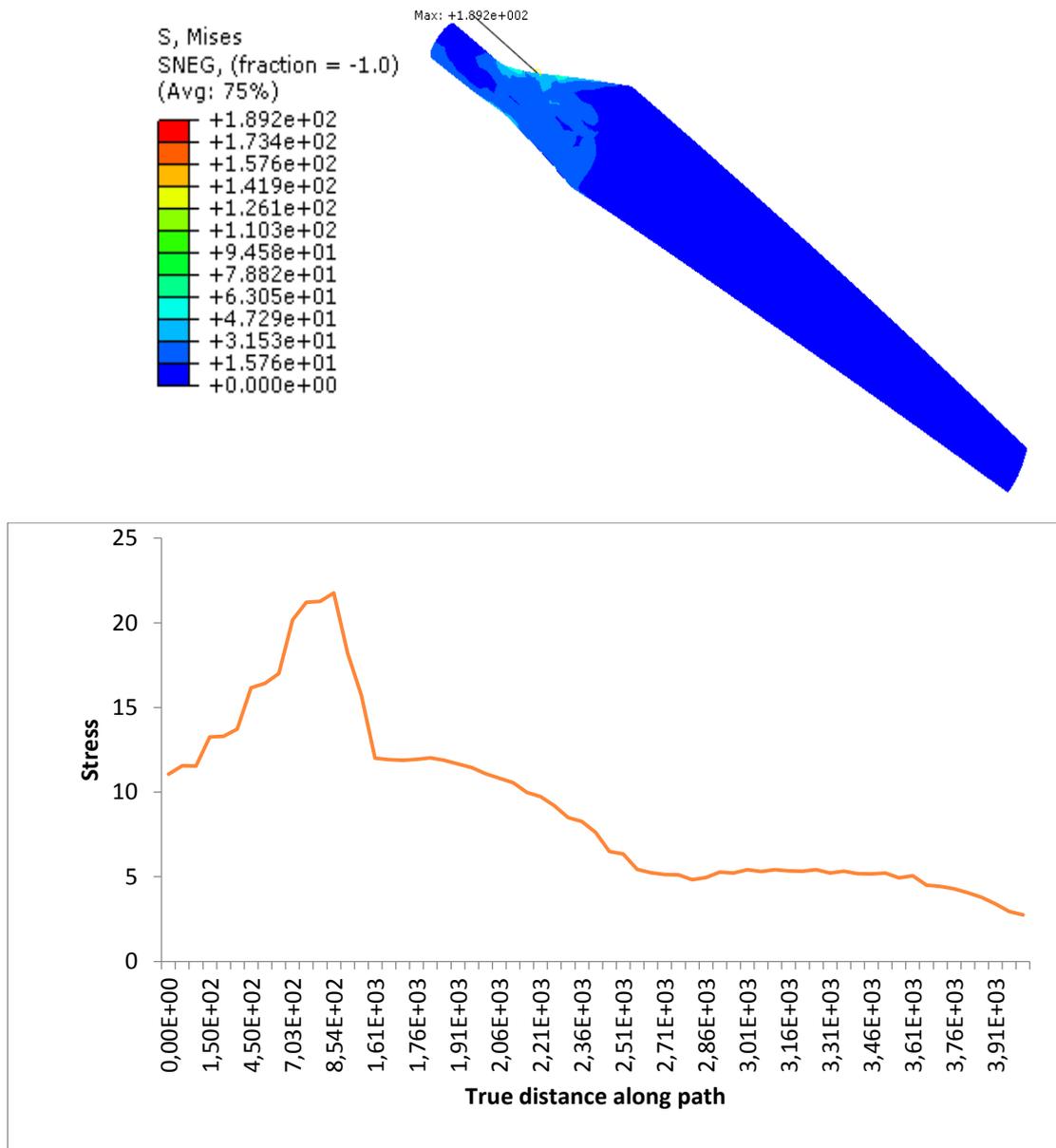


Figure 4.9 : contrainte en marche normale

4.9.2. Les déformations

A gauche est donné la distribution des déformations en échelle colorée, alors qu'à droite est donnée l'évolution de la valeur de la déformation le long de la pale. De façon similaire à la contrainte la déformation diminue le long de la pale.

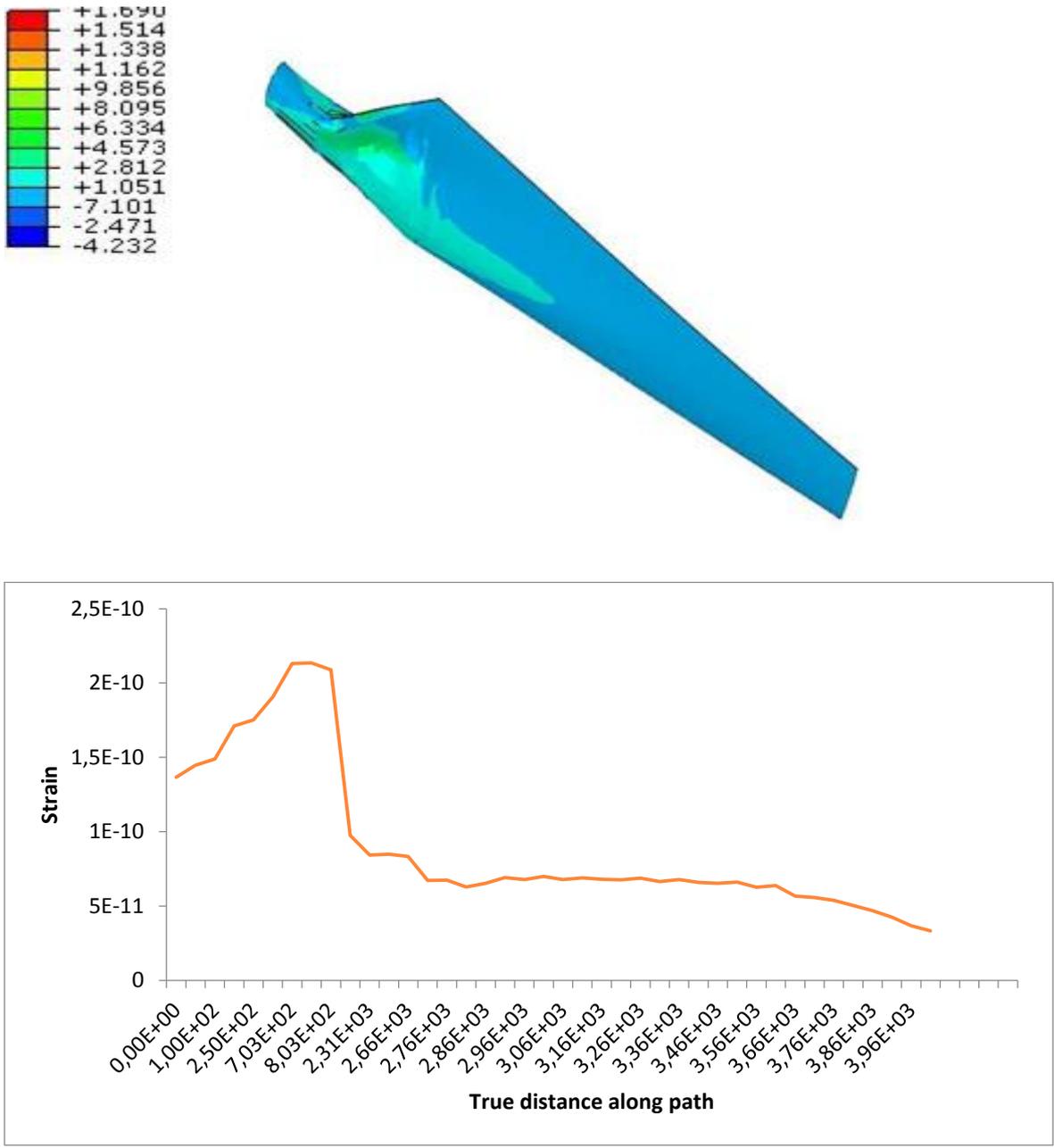


Figure 4.10 : déformation en marche normale

4.9.3. Déplacement

A gauche est donné l'évolution des déplacements en échelle colorée, alors qu'à droite est donnée l'évolution de la valeur du déplacement le long de la pale.

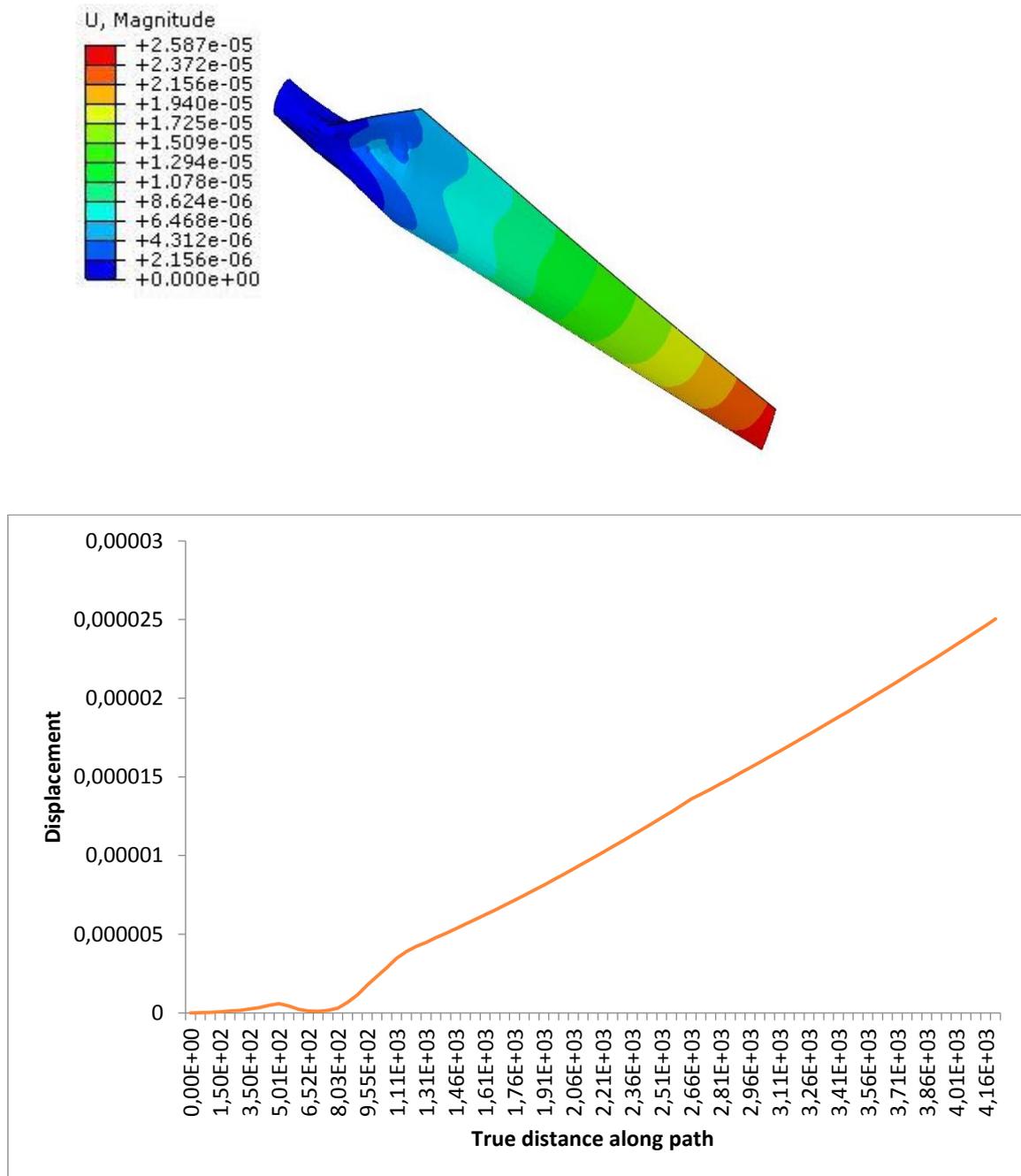


Figure 4.11 : déplacement en marche normale

En Résumé pour un fonctionnement sous un vent normal la contrainte maximum est 189.2, 5MPa, la déformation maximale est 1.7%, et un déplacement maximum est 0.3m.

4.10. Cas de Vent Extrême

4.10.1. Contrainte

A gauche est donné la distribution des contraintes en échelle colorée, alors qu'à droite est donnée l'évolution de la valeur de la contrainte le long de la pale.

Il est clair que la contrainte diminue le long de la pale.

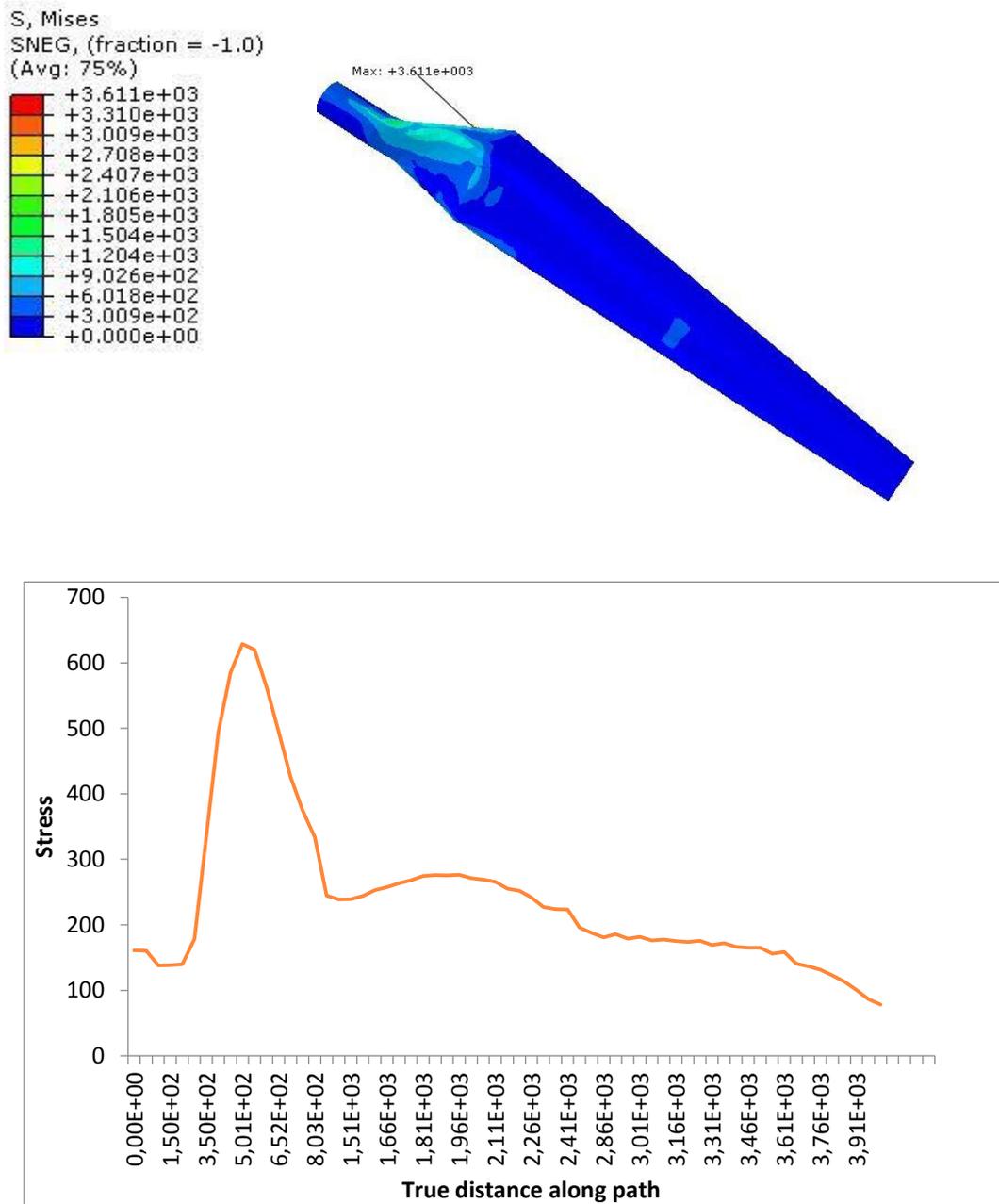


Figure 4.12 : contrainte en marche normale

4.10.2. Déformation

A gauche est donné la distribution des déformations en échelle colorée, alors qu'à droite est donnée l'évolution de la valeur de la déformation le long de la pale. De façon similaire à la contrainte la déformation diminue le long de la pale.

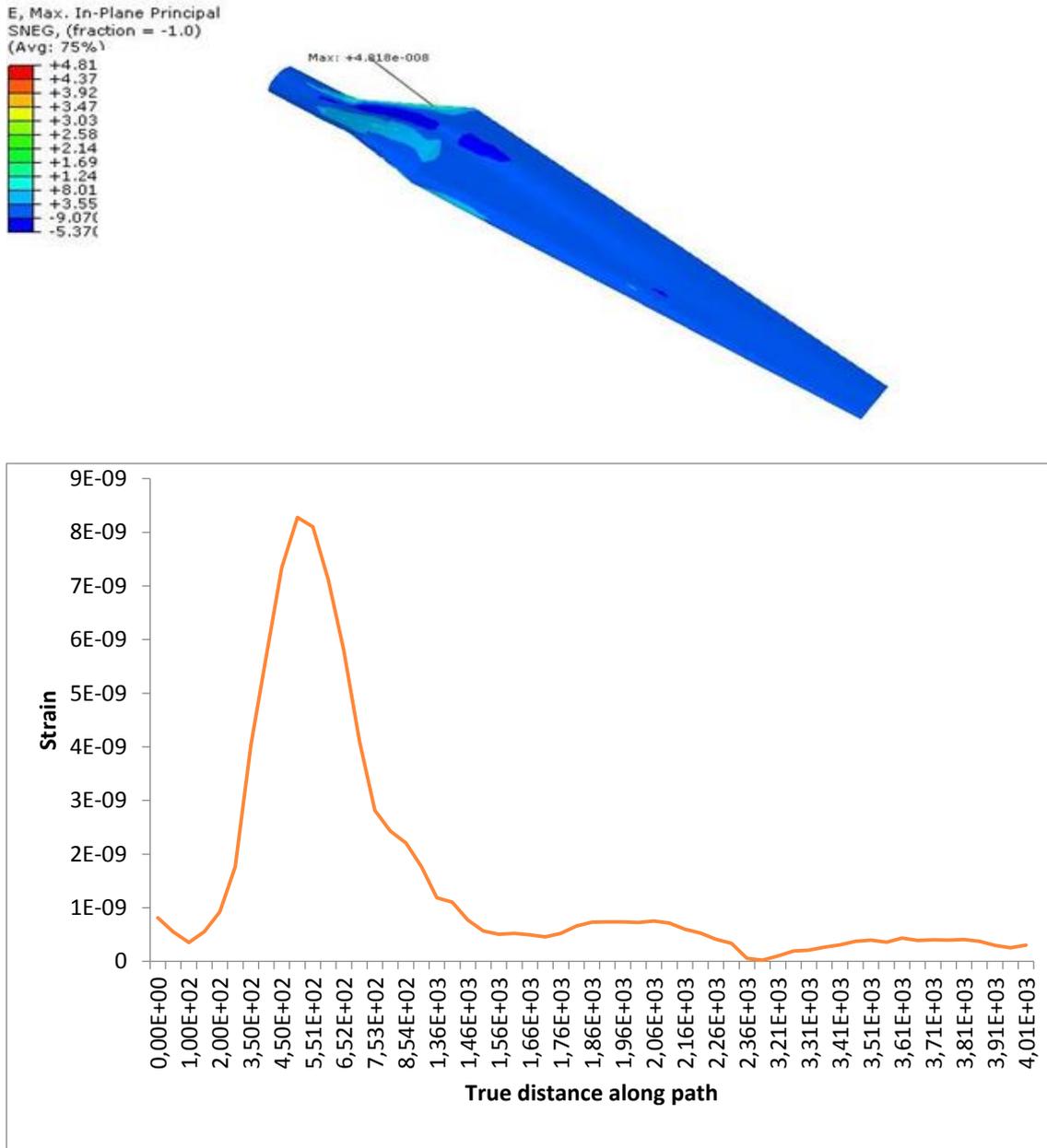


Figure 4.13: déformation en cas vent extrême

4.10.3. Déplacement

A gauche est donné l'évolution des déplacements en échelle colorée, alors qu'à droite est donnée l'évolution de la valeur du déplacement le long de la pale.

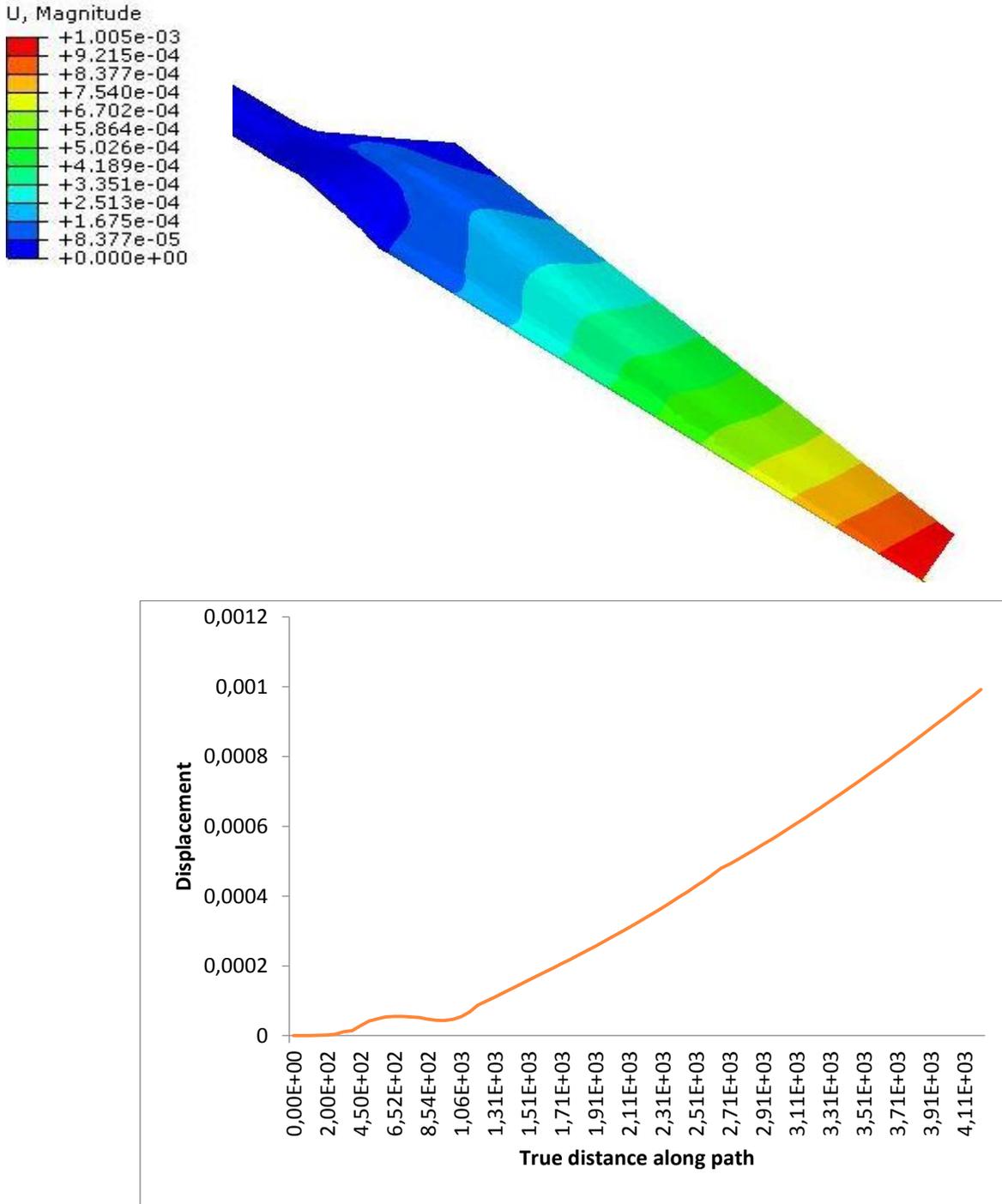


Figure 4.14: déplacement en cas vent extrême

En Résumé et pour un fonctionnement sous un vent extrême la contrainte maximum est de 3.61E03MPa, la déformation maximum est 4.8%, et un déplacement maximum de 0,01 m.

Conclusion

L'Algérie possède un gisement éolien important, que ce soit sur le littoral, ou à l'intérieur du pays aux hauts plateaux ou encore plus vers l'intérieur, au Sahara. Ces ressources peuvent contribuer dans le développement socioéconomique durable de quelque région très éloignées et isolées de façon très efficace avec un cout minime. Ceci nécessite une certaine maitrise des technologies des éoliennes pour éviter une simple consommation de cette technologie, mais plutôt son adaptation aux conditions spécifiques de notre climat dans le souci d'une utilisation optimale. Le présent travail entre justement dans ce cadre.

Le présent travail commence par des données générales en relation avec le sujet. Mais présente par la suite, la théorie nécessaire dans la conception d'une pale d'éolienne, En arrêtant les conditions du site et en choisissant un profil NACA 23015, la pale est conçue. Vient ensuite l'étape de l'estimation et du calcul des efforts subits par la pale lors de son fonctionnement. Ces efforts sont calculés sous deux conditions de fonctionnements à savoir ; marche normale et sous tempête.

Une phase importante dans le travail, consiste à étudier le comportement et la résistance mécanique de la pale par l'utilisation de la méthode des éléments finis. La difficulté dans ce cas est liée à la géométrie complexe de la pale d'une part. Mais d'autre part, lié aussi à la morphologie de la pale constitué par une peau mince en composite et d'un cœur jouant le rôle d'une ossature. Dans notre cas, et vue la dimension qui n'est pas très élancée, on a opté pour un coeur en mousse technique. Une certaine difficulté dans la définition et de la compatibilité géométrique des constituants de la pale a été surmontée lors de l'utilisation du logiciel d'éléments finis. Une fois la géométrie définie, les sollicitations modélisées, il est vérifié le comportement mécanique de la pale pour les deux conditions de fonctionnement.

INTRODUCTION	2
1.1. Historique de l'énergie éolienne	5
1.2. Les énergies renouvelables	5
1.3. principales sources d'énergies renouvelables	6
L'énergie solaire	6
L'énergie éolienne	6
La biomasse	7
L'énergie hydraulique :	8
L'énergie géothermique :	8
L'énergie des mers ou énergie marine	9
1.4. Les énergies et leur avenir	10
1.5. Utilisations du vent	11
Figure I.8: Schéma des circulations atmosphériques terrestres	12
1.5.2. Mousson	12
1.5.3. Origine du vent	13
1.5.3.1. Cas général	13
1.5.3.2. Cas particuliers	14
1.5.4. Effets des montagnes	14
Figure I.10 : Effets des montagnes	14
1.5.5. Effets de la végétation et de la rugosité du paysage	15
Figure I.11 : Régime de brise	16
1.5.7. Effets des vallées (goulets)	17
1.5.8. Effets de méso-échelle	17
1.6. Description de la variation du vent : La distribution de Weibull	18
Modèle général des variations de la vitesse du vent	18
1.7. Technologie des grands aérogénérateurs	19
Evolution de la technologie et de l'offre commerciale	19
1.8. Caractéristiques aérodynamiques des turbines, intérêt de la vitesse variable	20
1.9. Cinétique du vent – conversion énergie mécanique.	21
1.10. Énergie cinétique du vent – conversion énergie mécanique	22
Loi de betz	22
1.11. Qu'est-ce que l'énergie éolienne ?	25
1.12. Classification des éoliennes	25
1.12.1 Eoliennes à axe horizontal	25
1.12.2. Eoliennes à axe horizontal Amont	26
1.12.3. Eoliennes à axe horizontal Aval	27
1.13. Les différents types d'éoliennes	29

2.1. Descriptif d'une éolienne	31
2.2. Fonctionnement	33
2.2 Principaux composants	35
2-3 principaux composants de l'éolienne moderne	37
2.4. Structure générale de la transmission de puissance d'une éolienne	39
2.5. L'importance du générateur électrique	39
2.7. Pourquoi la plupart des éoliennes sont-elles trois pales ?	41
2.8. Configuration des pales	42
2.9. Cut-in Speed/Cut out speed	43
2.10. Intégration de l'énergie éolienne dans le système électrique	44
2.11. Etude préliminaire de mécanique des fluides	45
2.12. Interaction Pale/Vent	48
2.12.1. Terminologie	48
2.12.3. Théorie des ailes	49
2.12.4. Vitesse Induite	53
2.12.5. Effet d'extrémité et déflexion de l'écoulement	54
2.13. Zones de fonctionnement de l'éolienne :	57
2.14. Eolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable	58
3.1. Introduction	61
3.2. Théories aérodynamiques	62
3.2.1 Théorie de l'écoulement axial (the axial momentum theory)	62
3.1.2 Théorie de l'élément de pale	65
Remarque	71
3.2 Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale	72
3.2.1 Calcul de la forme optimale de la pale	74
4.1. Géométrie des pales	78
4.2 Méthode des éléments finis	80
4.3 Analyses statique de la pale	81
4.3.1. type de sollicitation	81
4.3.2. Les forces appliquées	82
4.3.3. Détermination des forces subit par un élément de pale	83
4.4. Utilisation de l'outil d'Abaqus	83

4.5. Spécification du problème	84
4.6. Conditions aux limites	84
4.7. Analyse structurelle statique	85
4.8. Le maillage de la pale :	85
4.9. solutions de Cas de marche normale	85
4.9.1. Contraintes	86
4.9.2. Les déformations	86
4.9.3. Déplacement	87
4.10. Cas de Vent Extrême	89
4.10.1. Contrainte	89
4.10.2. Déformation	90
4.10.3. Déplacement	91
Conclusion	92

Références et Bibliographies

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIES

- [1].**C.W. Pereira**, « L'énergie éolienne Principe de fonctionnement », développement viable Mai ,**2006**.
- [2].Cours Eoliennes 2015□2016Auteur : Yann Cressault Laboratoire Laplace
les articles scientifiques Energie éolienne - technique de l'ingénieur.
- [3].**R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin**, « Strongwinds on the horizon:wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764.
- [4].Technique de l'ingénieur D 3 960.
- [5].Technique de l'ingénieur BM 4 640.
- [6].**S El Aimani**, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [7].**Christian BAK**: "Research in Aeroelasticity EFP-2006" RISØ National Laboratory-
TechnicalUniversity of Denmark
- [8].**O. Guerri**« *L'Énergie éolienne en Algérie: Un bref aperçu* », Centre de Développement des Energies Renouvelables Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 **2011**
- [9].**B.Multon,O.Gergaud,HB.Ahmed,X.Roboam,S.Astier,B.Dakyo ;C.Nichita**, « *Etat de l'art dans les aérogénérateurs électrique* », l'École Normale Supérieure de Cachan, France, mai **2002**.
- [10].**Axenne**, « *petit éolien* » Usages raccordes au réseau, conseil général des Landes
- [11].**A .Benretem , D. Khalfa , N. Zerari**, « *Assessment of the Wind Field in the East Coast Algerian Régions for the Installation of Wind Farms* », Laboratory ofElectromechanical Engineering Badji Mokhtar-Annaba University – Alegria ,16emes Journées Internationales de Thermique ,Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre, **2013**.
- [12].**HaritzaCOMBLONG**,Thèse Minimisation de l'impact des perturbation d'origineeolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable.de L'école national supérieur d'arts et métier centre de bordeaux.
- [13].**Meklid M.T., M. Agli F.**, Mémoire de PFE 'Les paramètres aérodynamique dans la conception de forme optimale d'éolienne',Université de Biskra, 2010.
- [14].**Sahraoui B., Belaid A.**, Mémoire de PFE 'Etude Technologique d'une éolienne à axe Horizontal et l'utilisation de la CAO dans sa conception', Université de Biskra, 2010.
- [15]. **J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers,JohnWiley&sons**; Wind EnergyExplained, Theory,Design and Application; LTD; England; September 2002.

- [16]. **Martin O. L, Hansen** : Aerodynamics of wind turbines — 2nd ed.2008.
- [17]. **J. F. Manwell and J. G. McGowan**, Wind Energy Explained , Theory, Design and Application
Second Edition,2009.
- [18]. Ion Paraschivou, Aéro dynamique subsonique ISBN 2.553.00684.5
- [19]. **Dayton A. Griffin**, Blade System Design Studies volume I et II Global Energy
Concepts, LLC 5729 Lakeview Drive NE, #100 Kirkland, Washington 98109
- [20]. **NORIMICHI NANAMI**, Vibration and structural response of hybrid wind turbine blades,
Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University.
- [21]. www.aerospaceweb.org, NACA Airfoil Series
- [22]. www.windpower.org/en/tour/wtrb/comp/index.htm
- [23]. www.kidwind.org/lessons/BBwindenergytechnology.html#gearbox
- [24]. www.openhydro.com/