

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Génie énergétique

Par : GUETTATFI RADWANE ABDENOUR

Sujet

**SYNTHESE SUR LE CALCUL DES EFFORTS APPLIQUES SUR UNE
PALE D'EOLIENNE**

Soutenu publiquement, le 13 / 06 / 2017 , devant le jury composé de :

M SEBBANE OMAR	MCA	Univ. Tlemcen	Président
M ALIANE KHALED	MCA	Univ. Tlemcen	Examinateur 1
M ALIANE ABD EL NOUR	MAA	Univ. Tlemcen	Examinateur 2
M ZINAI ABD EL HADI	MCB	Univ. Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2016/2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse ; qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à me donner l'aide et à ma réussite, à **ma mère**.

♥♥ A mon père, qui a été mon ombre durant toutes les années d'étude, et qui a veillé tout au long de ma vie à me donner l'aide et me protéger.

.....que DIEU me les garde et protège

♥♥ Une pensée particulière à mes très chères sœurs, NOUR EL HOUDA ET NASSIBA ISLEME et leurs familles, qui n'ont pas cessé de me rapporter un quelconque soutien dans la vie de tous les jours. Je demande DIEU de les bénir car elles sont précieuses pour moi.

♥♥ A tous les autres membres de ma famille, plus particulièrement à mon frère ZOUBIR MARWANE.

♥♥ Je dédie ce travail à ma chère femme que j'aime R. ASMA, qui ma aide et encourage, tout le temps.

♥♥ A tous mes amis avec qui j'ai eu la chance de partager des moments uniques et formidables qui seront gravés dans ma mémoire.

GUETTATFI RADWANE ABDENOUR

Remerciement...

Tout d'abord, je remercie le Dieu, notre créateur qui nous a protégé et permis de succéder dans notre vie et de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

La première personne que je tiens à remercier est mon encadreur Mr. **Zinai Abd el hadi**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Je remercie Mr : **Sebbane omar** MCA à l'université de Tlemcen de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens à remercier Mr : **Aliane Khaled** MCA à l'université de Tlemcen et Mr : **Aliane Abd El Nour** MAA, d'avoir accepté d'être membres du jury.

Mes sincères remerciements s'étendent également à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin et d'une manière plus personnelle, mes pensées les plus émues vont vers ma famille :

- ✓ Ma mère, pour son amour et son indéfectible soutien.
- ✓ Mon père, pour ses encouragements et son assistance, aussi bien matérielle que morale, grâce à qui ce mémoire a pu être mené à terme dans de bonnes conditions.
- ✓ Mes sœurs, pour le soutien et l'encouragement

GUETTATFI RADWANE ABDENOUR

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Les éoliennes	
I.1 Introduction	6
I.1.1 Energie éolienne	6
I.1.2 Aspects économiques de l'énergie éolienne	7
I.1.3 Aspect écologique de l'énergie éolienne	10
I.1.3.1 Destruction et la chute d'éléments composant l'éolienne	11
I.1.3.2 Le bruit	12
I.1.3.3 Risque pour les oiseaux	12
I.1.3.4 Impact visuel	13
I.2 Eléments constitutifs d'une éolienne	13
I.2.1 Mât	13
I.2.2 Nacelle	14
I.2.3 Rotor	14
I.2.4 Pales	15
I.2.4.1 Dimensionnement des pales	16
I.2.4.2 Construction et matériaux des pales	16
I.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne	18
I.4 Classification des éoliennes	19
I.4.1 Classification selon la taille	19
I.4.2 Classification selon le principe de fonctionnement	20
I.4.2.1 Eoliennes à axe horizontal	20
I.4.2.2 Eoliennes à axe vertical	22
I.4.2.2.1 Familles des éoliennes d'axe vertical	22
I.4.3 Comparaison entre les deux modèles	24
I.5 Distinction entre les éoliennes	25
I.5.1 Nombre de pales	25

I.6 Protection contre les vents importants.....	26
I.7 CONCLUSION	28
Chapitre II : Aérodynamique	
Introduction	30
II.1. Notions de base en aérodynamique	30
II.1.1. Définition	30
II.2. Rappels de mécanique des fluides	30
II.2.1. Equations de Navier-Stokes	30
II.2.2. Equations d'Euler	32
II.2.3. Equation de Bernoulli	32
II.2.4. L'écoulement	33
II.2.4.1. Ecoulement laminaire	33
II.2.4.2. Ecoulement turbulent	34
II.2.4.3. Ecoulement tourbillonnaire	34
II.3. Forces et moments aérodynamiques	35
II.3.1. Portance et traînée	36
II.3.1.1. Portance	36
II.3.1.2. Traînée	36
II.3.2. Coefficients aérodynamiques	37
II.3.2.1. Coefficient de portance et de traînée	37
II.3.2.2. Coefficient de pression (Le nombre d'Euler)	38
II.3.3. Définitions géométriques des profils	38
II.3.3.1. Classification géométrique des profils	39
II.3.3.2. Profils de type NACA	41
II.3.3.2.1. Classification les profils NACA	41
II.3.3.2.2. Profils NACA à quatre chiffres	41
II.3.3.2.3. Profils NACA à cinq chiffres	41
II.3.3.2.4. Profils NACA laminaire	42
II.4 Conclusion	43

Chapitre III : Calculs des efforts aérodynamiques agissant sur les pales

III.1.Introduction	45
III.2.Théories aérodynamiques.....	46
III.2.1. Théorie de l'écoulement axial	46
III.2.2. Théorie de l'élément de pale	51
III.3.Remarque	60
III.4.Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale	62
III.4.1. Calcul de la forme optimale de la pale.....	65
III.4.2. Calcul des efforts aérodynamiques sur le rotor	68
III.5.Conclusion	71

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1. Introduction.....	73
IV.2. Résultat et interprétation	73
IV.2.1. Répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil NACA 63-421	73
IV.2.2. Répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil. LS1-0417	74
IV.2.3. Distribution des charges aérodynamique sur une pale	77
IV.2.4. Distribution de la force axiale en fonction de le long de la pale.....	78
IV.3. Conclusion	80
Conclusion générale.....	82

Liste des symboles :

A_i :	aire de la section du flux d'air à la station i
a :	facteur d'interférence axial
a' :	facteur d'interférence tangentiel
B :	nombre de pales.
C_l :	coefficient de portance
C_{L} :	valeur optimale du coefficient de portance
C_d :	coefficient de traînée
C_p :	coefficient de puissance
D :	force de traînée
F :	facteur de correction de la circulation
dF_x :	force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.
dF_y :	force axiale élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.
L :	force de portance
P :	puissance extraite du vent
Q :	couple aérodynamique
T :	force axiale du vent sur le rotor
V_i :	vitesse de l'air à la station i
W :	vitesse relative de l'air
α :	Angle d'incidence
β :	Angle de vrillage
λ :	vitesse spécifique (Tip speed ratio)
λ_r :	vitesse spécifique locale

- Ω : vitesse angulaire de rotation du rotor
- ω : vitesse angulaire de rotation de l'air
- Γ : circulation effective de la pale au rayon r .
- Γ_∞ : circulation d'une hélice ayant un nombre infini de pales.
- φ : angle d'écoulement
- σ : coefficient de pleinitude local (local solidity)

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I.1 Premières utilisations de l'énergie éolienne.....	6
Figure I.2 Coût moyen du KWH éolien.....	9
Figure 1.3 Progression de la capacité mondiale de production de l'électricité éolienne.....	10
Figure I.4 Différents éléments constituant d'une éolienne.....	15
Figure I.5 Exemples de structures de pale.....	17
Figure I.6 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	18
Figure I.7 : Eoliennes à axe horizontal.....	21
Figure I.8 Distinction entre éoliennes à axe horizontal avec le rotor placé en amont avec gouverne, en amont avec contrôle actif et en aval	21
Figure I.9 : Eoliennes à axe Verticale.....	22
Figure I.10 Deux grands types d'éoliennes à axe vertical.....	23
Figure I.11 Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales...25	

Chapitre II :

Figure II.1. Définition de pression totale p_0 et statique p sur un tube de Prandtl.....	35
Figure II.2 Système de force aérodynamique s'exerçant sur un obstacle.....	37
Figure II.3: Coefficient de traînée utile (C_d), pour quelques obstacles aérodynamiques.....	39
Figure II.4 : Définition géométrique d'un profil d'aile.....	40
Figure II.5 profil biconvexe symétrique.....	41
Figure II.6 profil biconvexe dissymétrique.....	41
Figure II.7 profil plan convexe.....	42
Figure II.8 Profil creux.....	42
Figure II.9 Profil à double courbure.....	42

Chapitre III :

Figure III.1 : Ecoulement axial de l'air	50
Figure III.2 : Ecoulement de l'air à travers un élément annulaire	56

Figure III.3 Section d'un élément de la pale à un rayon r	60
Figure III.4 Organigramme de la méthode BEM, pour le calcul statique et énergétique du rotor.....	74
Chapitre IV :	
Figure IV.1 Distribution optimale de la corde	79
Figure IV.2 Angle optimal de vrillage	80
Figure IV.3 Distribution de l'effort axial le long de la pale	82

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tab I.1 Utilisation mondiale des sources d'énergie.....	8
Tab I.2 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.....	19
Tab I.3 Tableau récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe vertical par rapport aux modèles conventionnels d'éoliennes.....	24
Tab.I.4 Tableau récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales.....	26

Chapitre III

Tab IV.1: Distribution optimale de la corde et de l'angle de vrillage (Profil NACA 63-421).....	77
Tab IV 2: Distribution optimale de la corde et de l'angle de vrillage (Profil LS1-0417).....	78
Table IV.3 Distribution des charges aérodynamique, vitesse du vent 15 m/s, profil NACA 63-421.....	84

Introduction générale

Introduction générale :

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisée. Son utilisation dans le passé était très répandue dans la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau, le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....)

Dans ce temps-là, ces moulins à vent (aéromoteurs) étaient économiquement rentables et ils ont contribué au développement économique de l'Europe.

A partir du 19^{ème} siècle, ces applications commencent à perdre leur intérêt. Cela est dû à l'évolution technologique qu'a connu l'Europe.

Vers les années 1950 de nombreux prototypes aérogénérateurs (machine qui transforme l'énergie cinétique du vent en électricité) ont été construits dans le monde, mais ces installations ont été délaissées du fait de l'extension des réseaux interconnectés et des baisses de coûts de l'électricité conventionnelle. Ces prototypes n'ont pas pu déboucher sur des applications commerciales à cause du coût élevé de l'électricité éolienne et la compétitivité, sans cesse croissante, des combustibles fossiles.

Suite au premier choc pétrolier, des efforts pour développer à nouveau l'énergie éolienne ont été consentis, en particulier aux Etats-Unis et en Europe du Nord.

Après une période de tâtonnement, il s'est révélé que la bonne stratégie consiste à augmenter progressivement la puissance des aérogénérateurs, en s'appuyant sur la création de marchés subventionnés donnant une base industrielle suffisante pour le développement de ce domaine.

Cela était susceptible de diminuer considérablement le prix de revient de l'électricité éolienne.

La production de l'électricité sur réseaux est ainsi devenue la principale application de l'énergie éolienne, elle représente actuellement une activité industrielle et commerciale à part entière et en pleine croissance.

En plus de sa rentabilité économique, l'énergie éolienne a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants, ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets.

Les aérogénérateurs en fin de vie peuvent être recyclés aisément et le site peut être remis à l'état naturel ou agricole sans dépenses notables.

L'étude présentée dans ce mémoire a pour objectif de faire une synthèse des calculs des efforts aérodynamiques à partir de la thèse 'étude dynamique et optimisation des pales d'un aérogénérateur', pour optimiser les performances énergétiques d'un aérogénérateur, afin de maximiser l'énergie éolienne captée tout en diminuant les problèmes de structure. Cette optimisation est susceptible de minimiser les coûts liés à la production d'électricité.

Les pales d'un aérogénérateur sont exposées, durant leur fonctionnement, à des chargements cycliques complexes dus à des conditions environnementales sévères et très variables, comme le cas des vents forts.

Cette étude est introduite par une généralité sur les éoliennes leur aspect économique et écologique, fonctionnement et composition dans le premier chapitre, mettant ainsi classification et la protection contre les vents.

Après, petite présentation sur l'aérodynamique mais ce chapitre ne constitue pas une présentation générale de l'aérodynamique. Il s'attache seulement à en présenter les principaux concepts qui interviennent dans l'étude du comportement des structures soumises aux actions du vent. Et quelque notion de base et on définit les coefficients aérodynamiques, enfin les classifications des profils.

Ensuite, une modélisation aérodynamique de l'hélice est effectuée, dans le troisième chapitre.

L'objectif de cette partie est de déterminer les paramètres géométriques optimaux des pales, de calculer les efforts aérodynamiques qui s'exercent sur elles et d'estimer finalement la puissance maximale extraite par la machine.

La conception d'un aérogénérateur repose essentiellement sur la modélisation aérodynamique, étant donné que la forme géométrique de l'hélice a un grand impact sur le rendement énergétique de la machine et par conséquent sur sa rentabilité économique.

Pour les petites éoliennes, où le coût du kilowattheure reste encore élevé et le site d'implantation est généralement imposé, cette modélisation prend dans ce cas une importance particulière.

Dans cette partie deux théories sont utilisées, la première est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory), la deuxième est la théorie de la pale élémentaire (blade element theory). Cette dernière théorie tient compte de la rotation de l'écoulement de l'air engendré par la rotation des pales. La combinaison des deux approches permet de résoudre les équations des efforts et des couples aérodynamiques par la méthode itérative.

Dans la quatrième partie, nous présentons des résultats de programme exécuté sous forme des tableaux et graphes de coefficient de couple et poussé.

La force axiale, la force tangentielle et le moment et quelques caractéristiques concernant notre sujet étaient présentés pour comparaison.

Et on termine par une conclusion générale.

Chapitre 1 :

Les éoliennes

I.1 Introduction :

Aujourd'hui la production d'énergie électrique est une des causes principales de la pollution atmosphérique. Produire de l'électricité en continuant à utiliser les ressources fossiles traditionnelles signifie polluer l'air, l'eau et la terre. En revanche, la grande opportunité offerte par les énergies renouvelables permet de produire de l'énergie électrique de manière propre, en réduisant les impacts des activités et contribue à sauvegarder l'environnement.

Le solaire, l'éolien, la biomasse et la géothermie ont l'avantage d'être en abondance, disponible et au contraire du charbon, pétrole et gaz, sont inépuisables. Aujourd'hui les processus technologiques ont permis d'élever la fiabilité des infrastructures et centrales, en rendant la production renouvelable extrêmement sûre.

I.1.1. L'énergie Eolienne :

Parmi toutes les énergies renouvelables, hormis celle de la biomasse, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires, mouture du blé et le pompage de l'eau (**Figure I.1**). Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 3.000 ans avant J.C. ,environ.



Moulin de Blé



Pompe éolienne d'eau



Bateau à voile

Figure I.1 Les premières utilisations de l'énergie éolienne

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent [3].

Cependant, si l'énergie éolienne était considérée il y a près de trois décennies comme la moins prometteuse des énergies renouvelables, la situation a considérablement évolué avec le haut degré de maturité atteint ces dernières années par la technologie des aérogénérateurs à axe horizontal et le prix devenu compétitif.

De nos jours, l'énergie éolienne n'est utilisée principalement que pour un seul but : connexion au réseau avec obligation du distributeur d'acheter toute l'énergie générée [4].

Cependant, le bond que connaît actuellement l'éolienne et le fruit de l'essor remarquable que connaît l'électricité et son développement a profité du cumul de connaissances enregistré dans plusieurs domaines, dont notamment la météorologie, les machines électriques, l'aéronautique, la dynamique des structures, la chimie et la physique des matériaux et aussi l'électronique de puissance, d'où la multidisciplinarité de cette technologie.

I.1.2. Aspects économiques de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne réalise aujourd'hui le plus fort taux de croissance de toutes les filières énergétiques au monde. En dix ans, cette énergie a accompli une croissance moyenne de 29% par an. Elle ne représentait que 5000 MW en 1995, aujourd'hui l'électricité produite par cette filière à l'échelle mondiale dépasse les 60 000 MW.

C'est actuellement la source d'énergie la plus cotée. Sur la même période, l'utilisation de charbon n'a progressé que de 2,5% /an, le nucléaire de 1,8%, le gaz de 2,5% et le fuel de 1,7%. Le tableau I.1 donne plus de détails sur le développement des différentes sources énergétiques.

Tableau I.1 utilisation mondiale des Sources d'énergie [5]

La tendance de l'utilisation mondiale des Sources d'énergie (1995-2005)	
Source d'énergie	Taux annuel de croissance (%)
éolienne	28,6
Solaire Photovoltaïque	26,2
Géothermique	3,1
Hydroélectrique	1,6
pétrole	1,7
Gaz Naturel	2,5
Nucléaire	1,8
charbon	2,5

L'industrie éolienne a vraisemblablement pris son envol, grâce à la sophistication croissante des technologies éoliennes. Aujourd'hui une éolienne moderne produit, par an, 200 fois plus d'électricité que son équivalent il y a 20 ans. Ces gains technologiques se sont traduits, en gains économiques, le coût du kW a baissé d'un rapport remarquable grâce au progrès des technologies éoliennes. L'électricité éolienne qui coûtait entre 70 - 80 (US\$) le kWh au début des années 80, coûte actuellement entre 4 et 6 (US\$) le kWh, soit une baisse de l'ordre de 90% [5].

Dans certaines régions l'électricité éolienne revient moins cher que celle produite par des sources traditionnelles.

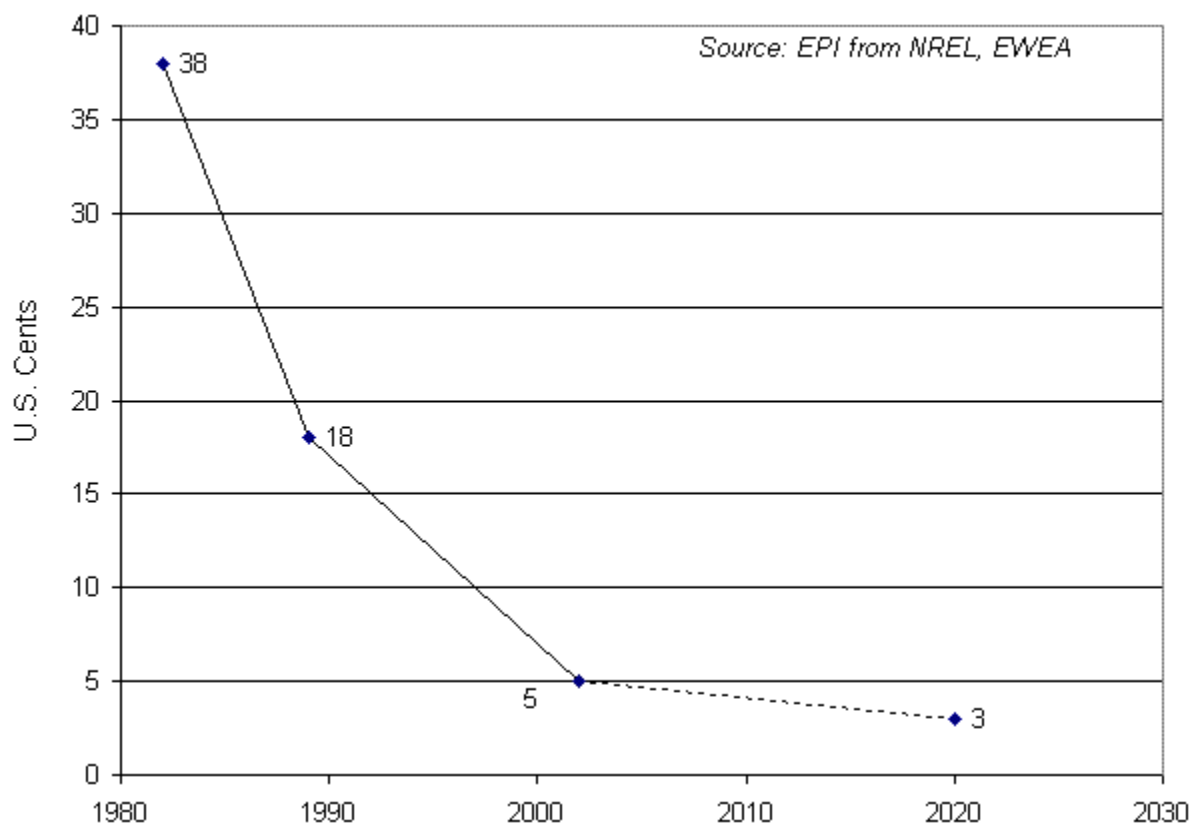


Figure I.2 Coût moyen du KWH éolien [5]

L'énergie éolienne offre des avantages économiques certains dans un marché énergétique mondial de plus de mille milliards de dollars par an. Puisque la stabilité des prix de l'électricité éolienne offre une sécurité énergétique, à long terme, que les sources d'énergie fossile ne peuvent pas assurer [6]. Cette énergie joue aussi un rôle positif dans le développement local grâce à l'électrification rurale et à la création de postes de travail.

Si ces coûts environnementaux et sanitaires étaient correctement intégrés à l'équation, il ne fait aucun doute que l'énergie éolienne deviendrait largement compétitive par rapport à l'utilisation des combustibles fossiles [7].

Malgré la domination de la filière éolienne par quelques pays (les trois-quarts de toute la capacité éolienne mondiale sont installés dans cinq pays seulement), l'énergie éolienne se développe très rapidement dans le reste du monde (35% en moyenne par année sur les dix années passées) [8].

Pour les petits systèmes éoliens, il est évident que les aérogénérateurs de petite puissance n'auront pas un impact majeur sur le bilan énergétique national ; néanmoins ils correspondent à des besoins spécifiques (comme dans les zones isolées) et peuvent générer des impacts non négligeables localement : sur le développement, l'emploi et l'environnement [9].

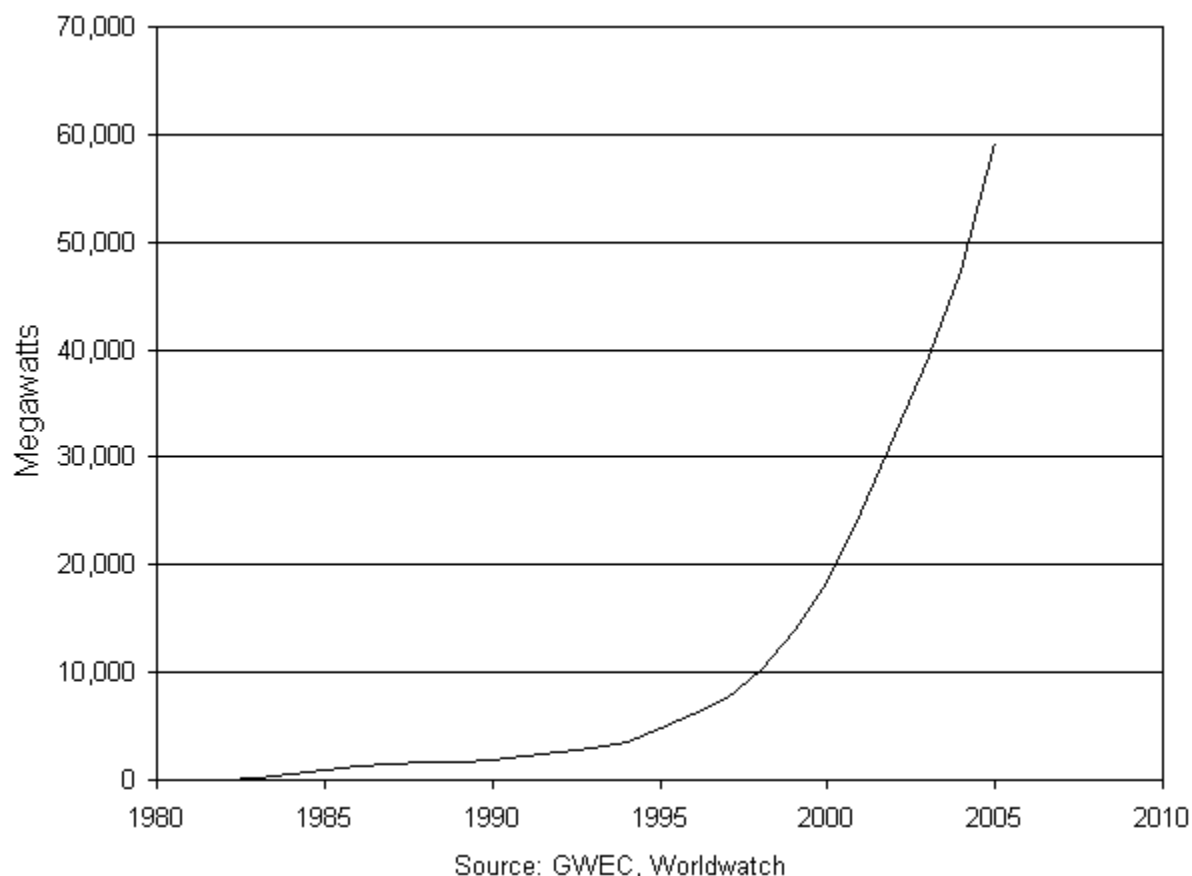


Figure 1.3 Progression de la capacité mondiale de production de l'électricité éolienne [6]

I.1.3. Aspect écologique de l'énergie éolienne :

L'approvisionnement énergétique est sans aucun doute l'un des enjeux majeurs du 21^{ème} siècle. En effet, les sources d'énergie actuellement utilisées présentent de grands risques environnementaux et sociaux. Le nucléaire a montré ses limites et ses dangers et l'utilisation des combustibles fossiles entraîne des changements climatiques.

Seul un développement rapide des énergies renouvelables peut nous permettre de relever le défi.

À la suite de la conférence de Kyoto en décembre 1997, la majorité des pays ont décidé de réduire leurs émissions de gaz responsables de l'augmentation de l'effet de serre. Cette décision devrait aboutir à une diminution de la consommation en énergie fossile (pétrole, gaz naturel, charbon...) au profit des énergies renouvelables, dont fait partie l'éolien.

L'énergie éolienne, qui est devenue actuellement économiquement rentable, a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets. Enfin les aérogénérateurs en fin de vie peuvent être recyclés aisément et le site peut être remis à l'état naturel ou agricole sans dépenses notables.

Si l'énergie éolienne est considérée comme l'une des sources les plus propres, cette énergie comporte encore des risques mineurs sur l'environnement.

Parmi les aspects négatifs de l'énergie éolienne sur l'environnement, on peut citer [13]:

I.1.3.1. Destruction et la chute d'éléments composant l'éolienne :

Les risques potentiels d'accident concernent, par ordre de probabilité, le bris de pales et la chute de la tour. Lors de la construction d'éoliennes, la résistance à la fatigue des matériaux ainsi que le comportement dynamique de la structure dans sa globalité sont étudiés avec soins. Les constructeurs conçoivent leurs éoliennes pour résister à des conditions météorologiques extrêmes (vents forts, rafales etc..).

Les composants soumis à des flexions répétées, comme les pales, peuvent développer des faiblesses structurelles si elles ont été mal conçues ou fabriquées.

Si la chute d'une tour est tout à fait rare, la rupture de pales est statistiquement plus importante. Ce fut notamment le cas avec les premières machines installées au début des années 80 équipées de pales métalliques. La mauvaise tenue à la fatigue du métal pouvait engendrer des fissures. Les pales sont

aujourd'hui fabriquées en majorité avec des matériaux composites qui ont l'avantage d'être légers et extrêmement résistants.

Malgré ces précautions, il peut arriver qu'une pale soit endommagée ce qui déclenche les systèmes automatiques d'arrêt d'urgence de la machine. Le cas d'un bris de pale et de projection de morceaux reste extrêmement limité selon les statistiques européennes.

I.1.3.2. Le bruit :

La nuisance causée par le bruit de la turbine est l'une des limitations principales de placer un site éolien près des régions habitées.

C'est en Europe, où la densité de population est forte, qu'est née cette préoccupation. Les fabricants ont maintenant considérablement réduit cette nuisance potentielle en améliorant l'aérodynamisme et en trouvant des moyens pour réduire le bruit des engrenages dans la nacelle.

Le niveau acceptable des émissions de bruit dépend fortement de la réglementation locale. L'une des réglementations les plus strictes en la matière est celle de la Hollande où le niveau maximal toléré à côté des résidences est de 40 db.

En Europe la distance typique entre l'aérogénérateur et la maison la plus proche est de 150 à 200 mètres.

I.1.3.3. Risque pour les oiseaux

Des études scientifiques ont démontré que la plupart des oiseaux identifient et évitent l'hélice qui tourne. Les aigles, et probablement d'autres oiseaux de proie, semblent moins vigilants lorsqu'ils chassent et certains ont été frappés par les pales en mouvement. Enfin, les oiseaux se posent sur les structures métalliques, comme les mâts en treillis. Ces derniers ne sont plus utilisés que pour les petites éoliennes domestiques. Les grandes tours blanches cylindriques empêchent les oiseaux de s'y installer et les éoliennes modernes comportent ainsi beaucoup moins de risque pour eux.

Il est néanmoins essentiel de s'assurer que le lieu d'un projet d'implantation d'éoliennes ne se situe pas dans un couloir de migration d'oiseaux, ni à proximité d'un site de reproduction.

I.1.3.4. Impact visuel

C'est la critique la plus fréquemment rencontrée. Il est vrai qu'avec ses 60 mètres de haut, une éolienne est facilement visible, d'autant plus que les parcs se situent en général sur des crêtes ou des sommets de colline.

La couleur blanche peut apparaître comme un choix peu judicieux mais c'est cependant celle qui se remarque le moins lorsque les éoliennes sont vues en contre-plongée avec le ciel en arrière-plan. Impossible à éliminer, l'impact visuel peut cependant être minimisé par des efforts de design des éoliennes et par le respect de certaines règles comme l'enfouissement des lignes à haute tension et l'utilisation de tour tubulaire plutôt qu'en treillis (type pylône électrique à haute tension) [14].

I.2. Eléments constitutifs d'une éolienne :

Une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux :

I.2.1. Mât :

C'est généralement un tube en acier, il supporte l'ensemble des équipements (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, suivant le type de l'éolienne il varie entre 10 et 100m. Etant donné que le vent souffle plus fort en hauteur le mât des éoliennes à axe horizontal est généralement entre 80 et 100m, à l'intérieur sont disposés des câbles de transport de l'énergie électrique, les appareillages de connexions au réseau de distribution (transformateur) ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.

I.2.2 Nacelle :

Qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique tel que l'arbre lent et rapide, les roulements, le multiplicateur, le générateur et les systèmes d'orientation des pales et de la nacelle. Pour capter au mieux l'énergie du vent, un calculateur est intégré dans la nacelle, afin d'orienter l'hélice perpendiculairement à la direction du vent, de modifier l'angle de calage des pales dans le cas d'un contrôle pitch, pour contrôler et coordonner tout cela la nacelle contient aussi divers actionneurs de commande. Les signaux émis par l'anémomètre (appareil qui mesure la vitesse du vent) sont transmis au système de contrôle commande de l'éolienne pour démarrer celle-ci si la vitesse du vent atteint 5m /s ou de l'arrêter si le vent dépasse 25m/s. Pour le système d'orientation de la nacelle, une girouette placée sur la nacelle indique le sens du vent, les signaux transmis à l'ordinateur permettent de commander le système d'orientation de la nacelle face au vent. Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. L'arbre lent relie le moyeu au multiplicateur et est muni d'un système de freinage hydraulique en cas de besoin. La vitesse de rotation de l'hélice est de 12 à 15 tr/min ce qui n'est pas suffisant à un alternateur pour fonctionner correctement, un multiplicateur est donc placé juste avant l'alternateur pour augmenter la vitesse de rotation à environ 1500 tr/min. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique actionné en cas d'urgence.

I.2.3 Rotor :

Est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire la pollution visuelle et le bruit. En effet un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

I.2.4 Pales :

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à son accouplement avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

Tous ces éléments sont représentés par **la Figure I.4**

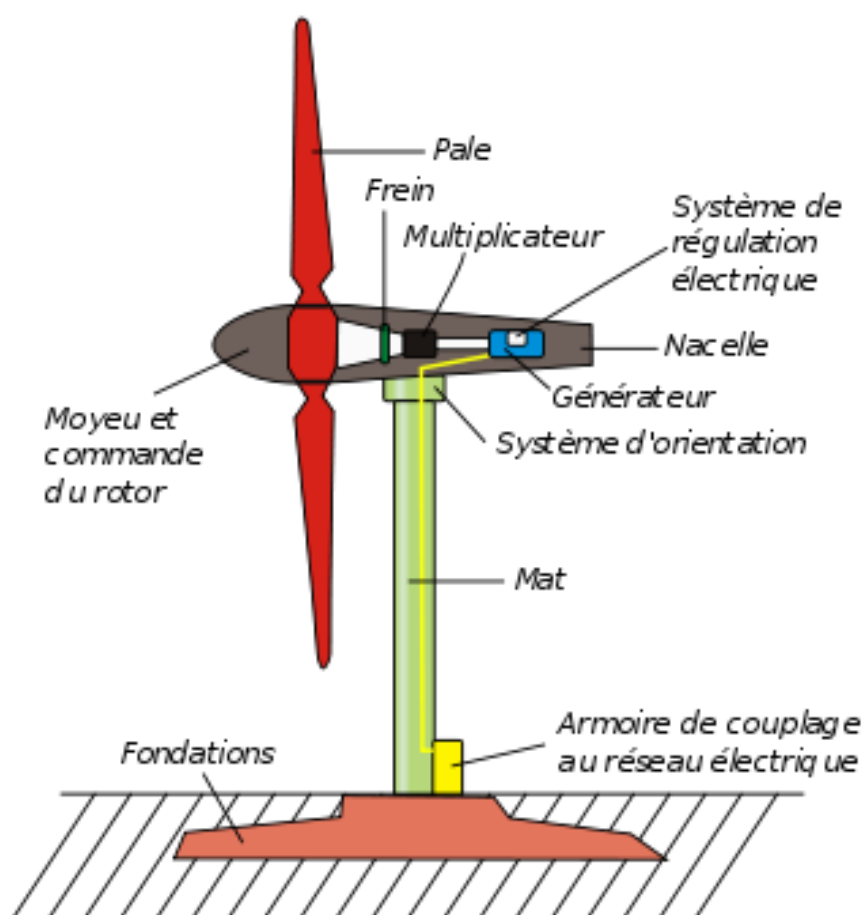


Figure I.4 Différents éléments constituant d'une éolienne [6].

Les pales forment une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien [6]. Cependant, il est bon de savoir que les pales déterminent grandement le rendement de l'éolienne et ces performances. La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement

aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, les conditions de vent (vitesses, taux de turbulence) influent sur la conception (charges extrêmes, tenue en fatigue).

Concevoir une pale revient à déterminer :

- ✓ La longueur de la pale :
- ✓ La largeur de la pale :
- ✓ Le profil aérodynamique de la pale
- ✓ Le calage initial et le gauchissement de la pale
- ✓ Les matériaux de fabrication de la pale
- ✓ Nombre de pales

I.2.4.1 Dimensionnement des pales :

La pale d'une éolienne [3] est en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. De ses performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine.

On s'aperçoit donc aisément que la conception d'une pale est en fait un procédé itératif avec de nombreux paramètres et de nombreuses contraintes. Il est indéniable que l'apparition de logiciels de calcul évolués associés à des optimisations facilite grandement la tâche du concepteur.

I.2.4.2 Construction et matériaux des pales :

Les techniques de construction et les matériaux utilisés pour les pales sont relativement proches de l'aéronautique.

On rencontre plusieurs types de matériaux [6] :

- ✓ **Le bois** : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.

Les techniques de bois [3] entoilé des moulins à vent est quasiment plus retenue de nos jours, ont fait place dans un premier temps à la construction métallique (alliages légers, inox), mis en œuvre par l'intermédiaire de structures à base de longeron et de nervures, recouverts par un revêtement de faible épaisseur. Outre l'inconvénient d'une masse structurale peu favorable,

de telles pales sont sensibles aux sollicitations alternées (fatigue), particulièrement dans le cas d'assemblages par rivets.

- ✓ **Le lamellé-collé [6]** : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue, mais cette technique n'est guère employée pour les éoliennes de grande taille.
- ✓ **Les alliages d'aluminium** pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
- ✓ **Les matériaux composites** : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

Assez rapidement [3], les matériaux composites à base de fibres de verre imprégnées de résines polyester ou époxyde se sont généralisés.

Depuis quelques années, les fibres de carbone ont également fait leur apparition. Les caractéristiques mécaniques de ces dernières sont bien sûr très intéressantes (rapport rigidité/masse très favorable), mais leur prix élevé comparé à celui de la fibre de verre tend à restreindre leur emploi aux machines à hautes performances.

La Figure I.5 présente quelques exemples de structures en fonction des matériaux utilisés.

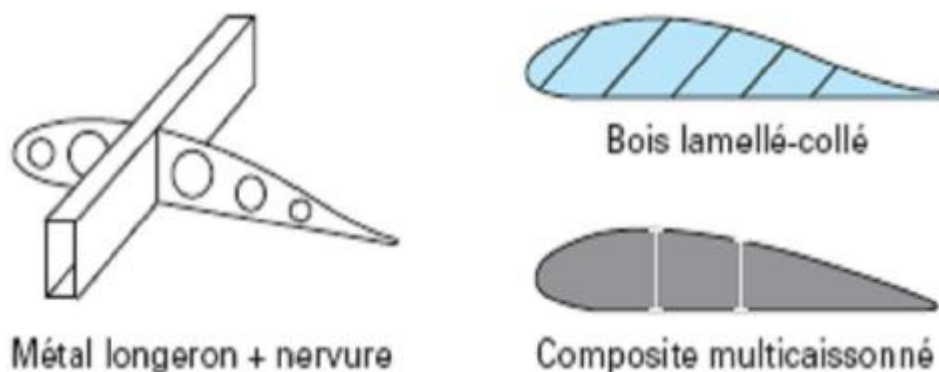


Figure I.5 Exemples de structures de pale [3]

Enfin, Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales [6] sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple.

I.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire (Voir **Figure I.6**). Enfin, il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées [7].

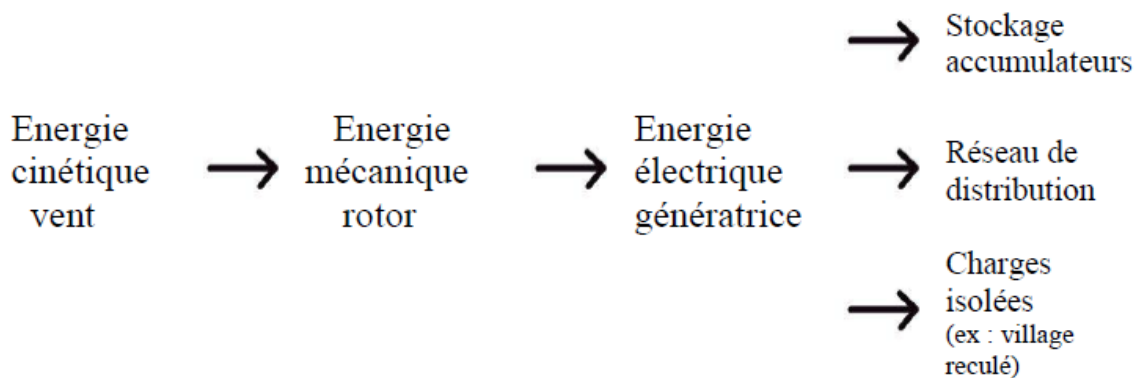


Figure I.6 Conversion de l'énergie cinétique du vent [01].

I.4 Classification des éoliennes :

On peut classifier les éoliennes suivant leur taille ou suivant leur principe de fonctionnement.

I.4.1 Classification selon la taille

On définit différentes classes de taille d'éoliennes (**Tab I.2**). En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, une règle de bonne pratique veut que la hauteur du mât, L , soit égale au diamètre du rotor, D . Dans ce cas, il y a un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance. Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées. Attention, il s'agit bien d'ordres de grandeur de puissance. Le but est uniquement de se donner une idée. En outre, cette puissance n'a de sens que si on a défini la vitesse de vent à laquelle elle est délivrée.

Tab I.2 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.

Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m ²]	Puissance [kW]
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.25
Mini	1.25-3	1.2-7.1	1.5
Domestique	3-10	7-79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000

On trouve classiquement ces éoliennes pour les applications suivantes :

- **Micro-éoliennes** : en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes).
- **Mini-éoliennes** : essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maisons isolées).
- **Eoliennes domestiques** : elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers.
- **Eoliennes petites commerciales** : elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.
- **Eoliennes moyennes commerciales** : elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens.
- **Eoliennes grandes commerciales** : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.

I.4.2 Classification selon le principe de fonctionnement

I.4.2.1 Les éoliennes à axe horizontal :

Leur typologie est souvent identique. A la base, on a un mât sur lequel est placée la nacelle (**Figure I.7**). Cette nacelle contient la génératrice ainsi que le système de transmission, c'est-à-dire les éléments d'accouplement mécanique entre le rotor et la génératrice. Celle-ci convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.



Figure I.7 : les éoliennes à axe **horizontal**

En suivant le sens de parcours du vent, le rotor peut être placé en amont ou en aval de la nacelle (**Figure I.8**). Cette dernière configuration a été à la mode, mais devient anecdotique. Elle présentait l'avantage que la nacelle et le rotor se mettent automatiquement face au vent. Lorsque le rotor se situe en amont, il faut un dispositif particulier pour que l'éolienne se positionne correctement. Par exemple, on peut trouver une aile fixe verticale qui stabilise l'éolienne face au vent (même principe que la gouverne verticale d'un avion) ou un moteur qui réalise cette tâche. On parlera alors d'un dispositif de positionnement passif ou actif, respectivement.

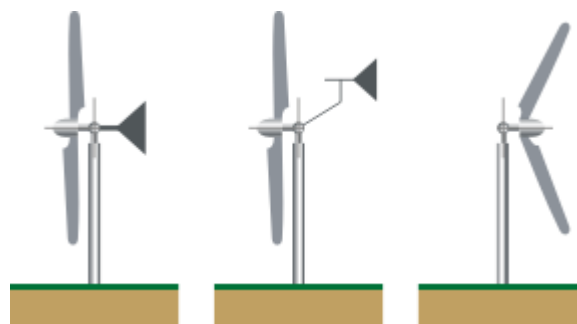


Figure I.8 Distinction entre éoliennes à axe horizontal avec le rotor placé en amont avec gouverne (figure gauche), en amont avec contrôle actif (figure centrale) et en aval (figure de droite).

I.4.2.2 Les éoliennes à axe vertical :

La **Figure I.9** montre les éoliennes à axe vertical pour les applications de petite voire de moyennes puissances. Les avantages de cette configuration sont que l'éolienne est toujours bien positionnée par rapport au vent, que le dispositif d'accouplement ainsi que la génératrice se trouvent au niveau du sol ce qui facilite la maintenance. En outre, de par les diamètres de rotor inférieurs aux éoliennes à axe horizontal, les vitesses absolues sont plus faibles ce qui, du moins théoriquement, devrait engendrer moins de bruit.



Figure I.9 : les éoliennes à axe **Vertical**

I.4.2.2.1 Familles des éoliennes d'axe vertical :

Classiquement, on distingue deux grandes familles parmi les éoliennes à axe vertical (figure I.10)

- ✓ **Familles basées sur le modèle Darrieus** : ce sont en général des éoliennes basées sur la "portance".
- ✓ **Familles basées sur le modèle Savonius** : ce sont des éoliennes basées sur la "trainée".

Le principe physique de ces modèles : elles donnent peu de couple au démarrage. Par conséquent, elles ne démarrent qu'à une certaine vitesse de vent, ou il faut assurer mécaniquement le démarrage de l'éolienne pour qu'elle fonctionne.

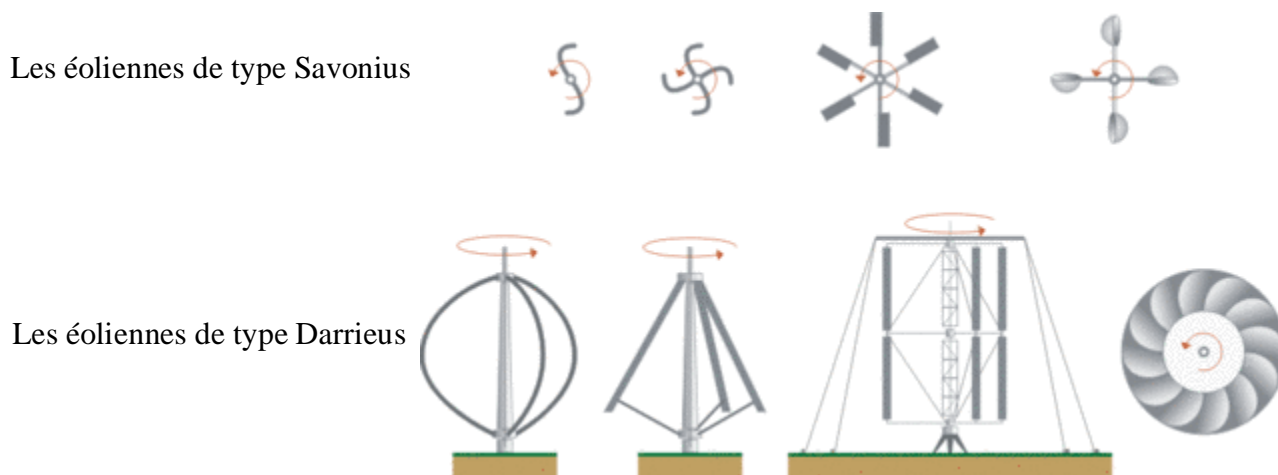


Figure I.10 Les deux grands types d'éoliennes à axe vertical

Les figures du haut montrent une coupe horizontale du rotor vue selon un axe vertical. Les figures du bas montrent une coupe horizontale du rotor d'éolienne Darrieus. Le rotor peut avoir une forme en "phi", en "delta", en "H" (**Figure I.10**).

Dans l'histoire des éoliennes, on trouve de manière cyclique un regain d'intérêt pour les éoliennes à axe vertical. Les nouveaux concepts proposés sont sensés dépasser les limites technologiques du standard actuel qui est l'éolienne à axe horizontal avec rotor en amont.

I.4.3 Comparaison entre les deux modèles :

Dans le tableau suivant **Tab I.3** on expose les propriétés des éoliennes à axe vertical par rapport aux modèles conventionnels d'éoliennes.

Tab I.3 Tableau récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe vertical par rapport aux modèles conventionnels d'éoliennes.

Propriétés des éoliennes à axe vertical par aux modèles standards	Avantages	Inconvénients
Simplicité	Parfois oui, on peut arriver à un concept plus simple	Parfois non, on n'aboutit pas systématiquement à plus de simplicité
Meilleure fiabilité		Peu probable, mais peu de retour d'expérience
Positionnement	Toujours bien placé par rapport au vent	
Entretien	Equipement au niveau du sol	
Prix	Moins cher, mais le rendement est-il égal ?	
Rendement mécanique (transformation énergie du vent)		Peu de retour d'expérience
Rendement économique		Peu de retour d'expérience
Émission de bruit	Théoriquement moins bruyantes parce que les vitesses sont plus faibles	

I.5 Distinction entre les éoliennes :

On peut faire une distinction entre les éoliennes suivant :

I.5.1 Le nombre de pales :

On peut faire une distinction entre les éoliennes suivant le nombre de pales (**Figure I.11**).

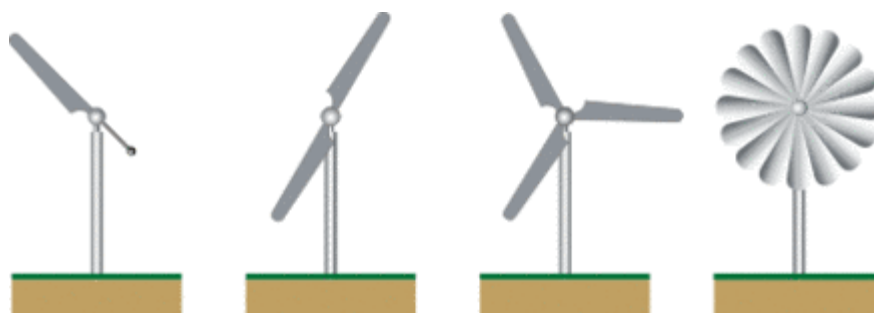


Figure I.11 Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

Dans le cas des éoliennes à axe horizontal, la plupart des éoliennes ont 3 pales. En fait, il s'agit du meilleur compromis entre différentes contraintes. Une éolienne à 3 pales (ou plus) tourne plus régulièrement qu'une éolienne à 1 ou 2 pales (**Tab I.4**), on a un meilleur équilibre du rotor. D'un point de vue esthétique, les effets de battement visuel sont plus importants pour les éoliennes à moins de 3 pales. Le rendement aérodynamique, c'est-à-dire la capacité à convertir l'énergie du vent en énergie mécanique (et donc, in fine, en électricité), est équivalent de 2 à 4 pales. Il augmente sensiblement à partir de 5. Le seul avantage d'avoir une éolienne à deux pales plutôt qu'à trois est qu'elle sera meilleure marché, mais elle tournera de manière moins régulière ce qui est synonyme de durée de vie plus courte. On ne monte pas au-delà de 4 pales à cause de la diminution de la tenue mécanique : en effet, la "corde" des pales, diminue avec le nombre de pales.

Tab.I.4 Tableau récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales.

Nombre de pâles	1	2	3	4	5
Équilibre du rotor	-	-	+	+	+
Esthétique (effet de battement visuel)	-	-	+	+	+
Rendement aérodynamique	-	=	=	=	+
Bruit et fatigue	-	-	+	+	+
Tenue mécanique	+	=	=	-	-

Dans le cas des éoliennes à axe vertical, il existe des modèles avec un grand nombre d'ailettes donnant à l'ensemble un aspect très compact. Cette forte densité n'est pas nécessairement synonyme de meilleures performances (aérodynamiques). La puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor. Cette surface ne varie pas en augmentant le nombre de pales.

I.6 La protection contre les vents importants :

C'est un aspect fondamental. En effet, en présence de vents importants ou de rafales, il s'agit d'éviter les contraintes mécaniques trop importantes et les vitesses de rotation excessives, c'est-à-dire d'éviter la casse, d'assurer l'intégrité du matériel.

On distingue d'une part les stratégies de contrôle par l'aérodynamique. On joue sur l'orientation des ailes pour modifier leurs propriétés aérodynamiques et donc réduire la force exercée par le vent.

- Soit on réduit l'angle d'attaque des pales qui présentent alors un rendement plus faible. On peut aller jusqu'à mettre les pales face au vent où elles seront soumises à une force nulle.
- Soit on augmente l'angle d'attaque jusqu'au décrochage du profil ("stall control" en anglais).

Une autre manière de procéder est de placer directement un frein aérodynamique sur l'aile (mais cela est physiquement équivalent à chercher le décrochage).

Ces modifications des propriétés aérodynamiques peuvent être réalisées sur la totalité de l'aile ou sur seulement une fraction de celle-ci, par exemple sur le bout d'aile.

À noter que l'on peut jouer sur l'orientation de l'éolienne à axe horizontal. Dans ce cas de figure, il s'agit de réduire la surface présentée au vent par le rotor de l'éolienne en la décalant par rapport à la direction du vent. Comme cette surface est réduite, la puissance du vent est directement réduite. Typiquement, on décale l'éolienne à gauche ou à droite suivant son axe vertical, soit on place l'éolienne en "hélicoptère" en tirant le rotor vers l'arrière.

D'autre part, on trouve le freinage dynamique ou électrique. Dans ce cas, c'est un frein mécanique qui limite la vitesse de rotation. Cette fonction peut être réalisée par la génératrice électrique.

Le freinage aérodynamique est une stratégie dont on ne peut se passer pour les grandes éoliennes. On peut se limiter au freinage dynamique que pour les éoliennes de faible puissance.

I.7 CONCLUSION

La filière éolienne est probablement la plus grande réussite parmi les technologies des énergies renouvelables, puisque ses coûts sont devenus aujourd'hui compétitifs avec d'autres filières traditionnelles.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts, cette filière occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays, et elle représente aujourd'hui une production mondiale de 60 000 MW.

Dans ce premier chapitre, On a présenté les éoliennes, Leurs composants, leur classification, les matériaux utilisés pour leur fabrication.

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance maximale à environ 15m/s. Le choix d'un site favorable pour implanter les machines éoliennes avec un bon rendement est l'étape la plus cruciale.

Chapitre II :

L'aérodynamique

Introduction :

L'aérodynamique est la science qui a pour objet l'étude des mouvements de l'air autour des corps. En d'autres termes, il s'agit des phénomènes mis en jeu chaque fois qu'il existe un mouvement relatif entre un corps et l'air qui l'entoure. Le corps peut se déplacer dans le fluide immobile (avion en vol) ou être fixe dans le fluide en mouvement (maquette dans une soufflerie)

Ce chapitre ne constitue pas une présentation générale de l'aérodynamique. Il s'attache seulement à en présenter les principaux concepts qui interviennent dans l'étude du comportement des structures soumises aux actions du vent.

II.1. Notions de base en aérodynamique :

II.1.1. Définition :

Est une branche de la dynamique des fluides qui porte principalement sur la compréhension et l'analyse des écoulements d'air, ainsi qu'éventuellement sur leurs effets sur des éléments solides qu'ils environnent.

L'aérodynamisme (terme non scientifique) qualifie l'apparence d'un corps en mouvement dans l'air et sa résistance à l'avancement.

L'aérodynamique s'applique aux véhicules en mouvement dans l'air (aérodynes, automobiles, trains), aux systèmes de propulsion (hélices, rotors, turbines, turboréacteurs), aux installations fixes dans un air en mouvement subissant les effets du vent (bâtiments, tours, ponts) ou destinés à la production d'énergie (éoliennes), aux systèmes mécaniques transformant une énergie aérodynamique en énergie mécanique et vice-versa (turbines, compresseurs).

II.2. Rappels de mécanique des fluides :

II.2.1. Equations de Navier-Stokes :

La mécanique des fluides est régie au plan macroscopique par les équations de Navier-Stokes issues des principes de conservation habituels de la mécanique : conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Dans le contexte aérodynamique et du vent à basse altitude, ces équations se simplifient :

- les vitesses rencontrées sont largement inférieures à la vitesse du son et la masse volumique de l'air est supposée constante. C'est l'hypothèse d'incompressibilité ;
- la température de l'air est constante ;
- l'air est un gaz léger dont le poids propre est négligé devant les autres forces.

Les équations de Navier-Stokes sont réduites alors à l'équation de continuité et de la quantité de mouvement

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{II.1})$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \vec{\nabla})u = -\vec{\nabla}p + \mu \vec{\nabla}^2 u + \rho f \quad (\text{II.2})$$

Où \vec{u} est la vitesse, p la pression, ρ la masse volumique, f l'accélération due aux forces de volume et de surface et t le temps.

Ce système d'équations aux dérivées partielles doit être muni de conditions aux limites et initiales, notamment sur les parois solides.

Dans l'équation de la quantité de mouvement, le membre de gauche constitue la dérivée particulaire de la vitesse représentant l'accélération d'une particule de fluide qui se déplace. Le membre de droite traduit l'effet des contraintes internes et se décompose en un terme de pression hydrostatique, un terme de viscosité dû au frottement interne et un terme d'accélération dû aux forces de volume et de surface.

Le terme visqueux constitue un élément important de l'aérodynamique car on ne peut pas le négliger dans un écoulement à proximité d'une paroi solide à cause de la couche limite qui s'y développe.

Ce système non linéaire reste très difficile à résoudre numériquement pour les écoulements complexes rencontrés dans la pratique. Il faut même le considérer impossible à résoudre sans simplifications importantes sur la géométrie ou sur les phénomènes mécaniques traités [15].

II.2.2. Equations d'Euler :

Les équations d'Euler sont une simplification des équations de Navier-Stokes pour lesquelles on a négligé le terme dû à la viscosité. Elles sont utilisées en pratique pour calculer les écoulements loin de parois solides et assez souvent dans le domaine aéronautique pour les écoulements compressibles à grande vitesse. Elles sont généralement munies de modèles empiriques de parois afin de rendre compte de l'effet de couche limite [15].

II.2.3. Equation de Bernoulli :

L'équation de Bernoulli est très utile en aérodynamique. Naturellement elle contient des hypothèses simplificatrices par rapport aux équations de Navier-Stokes:

- fluide non visqueux,
- écoulement irrotationnel, c'est-à-dire $\vec{\nabla} \wedge \vec{u} = 0$

Son usage est très courant dans le cas d'un écoulement stationnaire incompressible.

Elle permet le long d'une ligne de courant de relier directement la pression statique p et la pression totale p_0 par :

$$\frac{1}{2} \rho |\mathbf{u}|^2 + p = p_0$$

Cette relation est largement utilisée en soufflerie pour calculer la vitesse moyenne à partir de la mesure des pressions statique et totale à l'aide d'un tube de Prandtl (souvent appelé à tort un tube de Pitot double, cf. **figure II.1**). La pression statique est la pression mesurée par un orifice placé perpendiculairement à l'écoulement moyen, tandis que la pression totale est mesurée dans l'axe de la vitesse moyenne. A noter que la pression totale est justement appelée parfois la pression d'arrêt du fait qu'il s'agit d'une pression obtenue à vitesse nulle dans l'axe de l'écoulement [15].

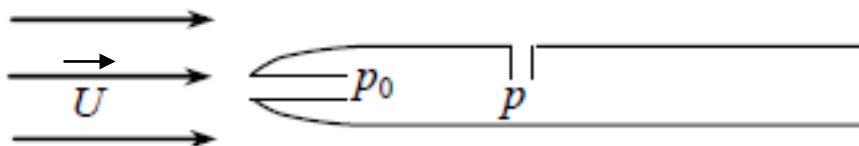


Figure II.1. Définition des pressions totale p_0 et statique p sur un tube de Prandtl.

II.2.4. Écoulement :

Terme générique définissant le déplacement de l'air. On distingue en général trois types d'écoulement classés selon le comportement des particules d'air :

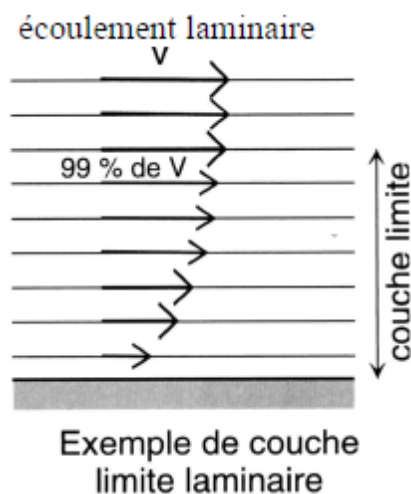
II.2.4.1. Écoulement laminaire :

Les particules d'air suivent des trajectoires parallèles et l'air en mouvement se comporte comme s'il était constitué de lames superposées glissant parfaitement les unes sur les autres.

Au voisinage d'une surface solide, la vitesse de l'écoulement ralentit au fur et à mesure que l'on s'en approche pour finalement s'annuler au contact de celle-ci.

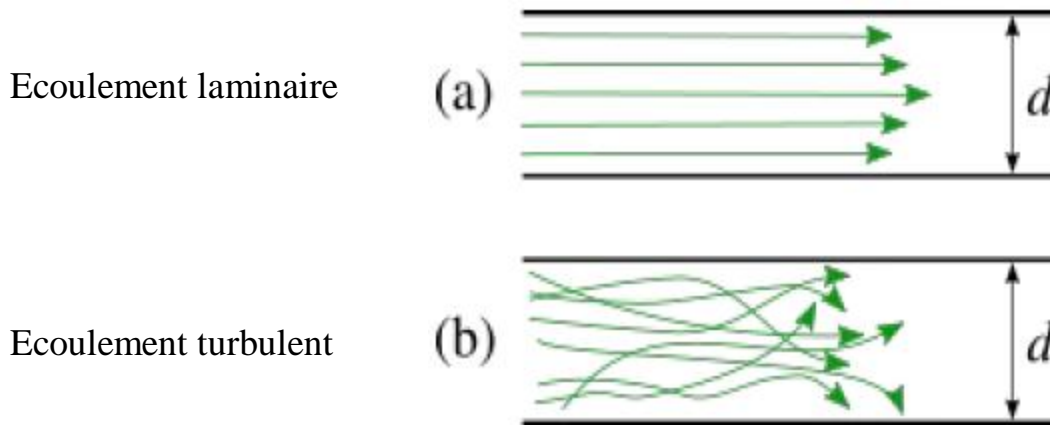
Cette couche d'air freinée s'appelle " **la couche limite** ".

La couche limite est cette couche d'air dans laquelle se produit l'effet de cisaillement, c'est la couche entre la surface et la limite de l'écoulement non ralenti que l'on appelle aussi l'écoulement potentiel (laminaire).



II.2.4.2. Écoulement turbulent :

Les particules d'air suivent des trajectoires quasiment parallèles entre elles, mais qui ne sont plus rectilignes, tout en se déplaçant globalement dans le même sens avec une même vitesse d'ensemble.



II.2.4.3. Écoulement tourbillonnaire :

L'ensemble de l'écoulement est très désordonné et, bien que globalement tout l'écoulement d'air se déplace dans la même direction, certaines particules peuvent remonter le courant et former ainsi des tourbillons.



Écoulement tourbillonnaire

II.3. Forces et moments aérodynamiques :

L'expérience montre qu'un corps solide en mouvement dans un fluide de vitesse \vec{U} subit de la part du fluide, des forces de résistance. Ce système de forces qui s'appliquent sur l'obstacle peut se réduire à une force \vec{F} et un couple \vec{C}

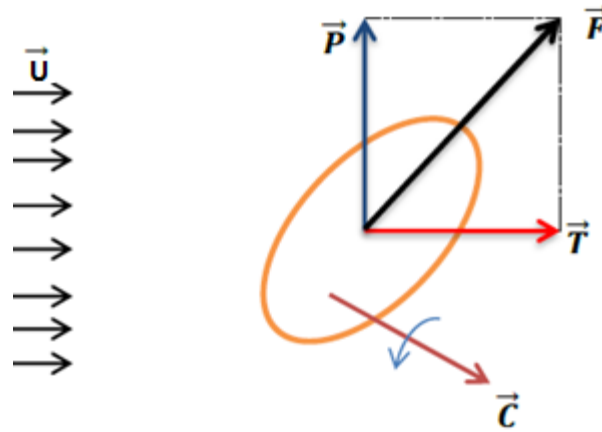


Figure II.2 Système de force aérodynamique s'exerçant sur un obstacle [15].

On décompose généralement \vec{F} en une composante parallèle à \vec{U} , la traînée d'intensité T , et une composante perpendiculaire à \vec{U} , la portance d'intensité P . Le moment résultant \vec{M} du système de forces est pris par rapport à un point ou un axe. Les expressions de ces forces dépendent de la densité ρ du fluide, de la vitesse \vec{U} , de la taille du profil, et de l'orientation du corps.

$$T = \frac{1}{2} C_x \rho S U^2 \quad \text{force de traînée} \quad (\text{II.1})$$

$$P = \frac{1}{2} C_z \rho S U^2 \quad \text{force de portance} \quad (\text{II.2})$$

$$C = \frac{1}{2} C_m \rho S U^2 L \quad \text{couple} \quad (\text{II.3})$$

D'où :

C_x, C_z, C_m : sont respectivement les coefficients de traînée, de portance et de couple

L : Longueur caractéristique de l'obstacle

S : maître couple de l'obstacle (la surface projetée normalement sur le plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement) [15]

II.3.1. Portance et la traînée :

II.3.1.1. Portance :

La portance est définie comme la résultante des forces exercées par le fluide dans une direction normale à la vitesse de l'écoulement. Elle est la partie utile de la résultante. Dès que celle-ci est égale ou supérieure au poids de l'avion, celui-ci peut se maintenir en équilibre dans l'air. C'est cette composante de la résultante aérodynamique qui maintient l'avion en l'air. La portance est la combinaison d'une surpression (sur l'intrados) et d'une dépression (sur l'extrados) [2-3].

II.3.1.2. Traînée :

La traînée par contre, est définie comme la résultante des forces exercées par le fluide dans la direction de la vitesse de l'écoulement. C'est la partie nuisible de cette résultante. Il faut savoir que plus cette traînée sera faible, plus l'avion avancera facilement. Cette traînée est composée de quatre traînées différentes.

- ✓ La traînée de forme : Appelée aussi traînée de profil, elle est due à l'épaisseur du profil.
- ✓ La traînée induite : Générée par la différence de pression entre l'intrados et l'extrados entraîne des tourbillons marginaux en bout d'aile.
- ✓ La traînée de frottement : Elle est due à la viscosité de l'air.
- ✓ La traînée d'onde : Engendrée lors des écoulements transoniques, où apparaissent des ondes de chocs [19].

II.3.2. Coefficients aérodynamiques :

II.3.2.1. Coefficient de portance et de traînée :

L'expérience montre que les coefficients de portance et de traînée varient avec :

- L'angle d'attaque
- La forme du profil
- La vitesse relative
- La masse volumique de l'écoulement
- La surface de l'obstacle [20]

La figure suivant (**Fig.II.3**), présente le coefficient de traînée pour quelques obstacles.

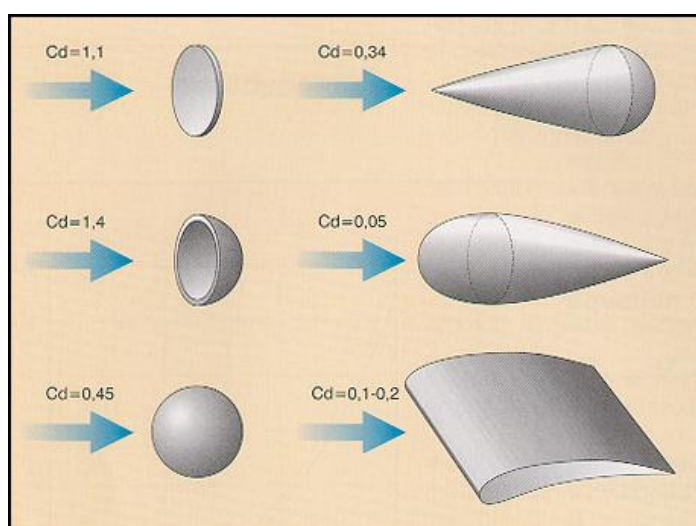


Figure II.3: Coefficient de traînée utile (C_d), pour quelques obstacles aérodynamiques [20]

II.3.2.2. Coefficient de pression (Le nombre d'Euler) :

Le coefficient de pression (ou le nombre d'Euler), C_p , permet d'indiquer les pressions sous forme adimensionnelle. Il s'agit du rapport entre les forces de pression et les forces d'inertie. En général, le coefficient de pression, s'écrit sous la forme :

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{P_{dy}} = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (\text{II.4})$$

D'où :

P_{dy} ; La pression dynamique,

$$P_{dy} = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \quad (\text{N/m}^2).$$

P et P_∞ ; sont respectivement la pression locale et la pression initiale de l'écoulement [20].

II.3.3. Définitions géométriques des profils :

Une définition géométrique d'un profil aérodynamique d'une pale est représentée sur la figure suivante :

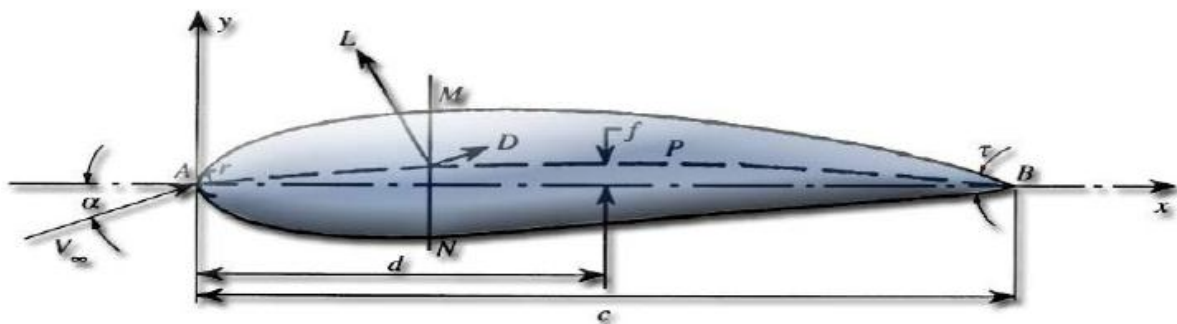


Figure II.4 : Définition géométrique d'un profil d'aile [20]

L'air aborde le profil par le bord d'attaque (A) et le quitte par le bord de fuite (B). La partie supérieure du profil est appelée extrados (AMB) et la partie inférieure intrados (ANB).

Le segment qui joint le bord d'attaque et le bord de fuite est appelé corde du profil (c). La distance entre l'intrados et l'extrados est l'épaisseur (NM). La valeur

maximale de l'épaisseur divisée par la longueur de la corde donne l'épaisseur relative (noté par e). La ligne qui joint le bord d'attaque au bord de fuite en passant à égale distance de l'intrados et de l'extrados est appelée corde moyenne (APB). La distance maximale entre la corde et la corde moyenne est appelée flèche du profil. Le rapport entre la flèche et la longueur de la corde est appelé courbure (ou cambrure) relative [10-4].

II.3.3.1. Classification géométrique des profils :

Les différents types de profils sont classés en cinq familles, suivants la forme géométrique générale qui sont [22] :

- ✓ **Biconvexe symétrique** : La ligne moyenne est rectiligne (confondue avec la corde). Voir figure II.5
- ✓ **Biconvexe dissymétrique** : La ligne moyenne est à simple courbure (intrados et extrados convexes). Voir figure II.6
- ✓ **Plan convexe** : La ligne moyenne est à simple courbure (intrados plat et extrados convexe). Voir figure II.7
- ✓ **Profils Creux** : La ligne moyenne est à simple courbure (intrados concave, extrados convexes). Voir figure II.8
- ✓ **Profils à Double courbure** : La ligne moyenne est à double courbure.

La figure (II.9) présente les cinq familles liées à la géométrie des profils,

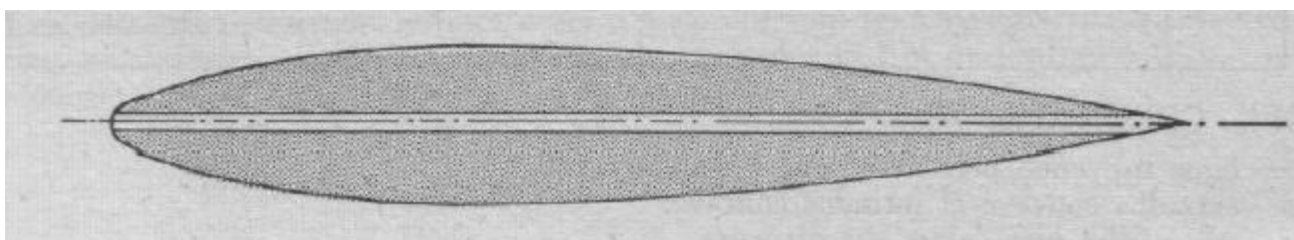


Figure II.5 profil Biconvexe symétrique

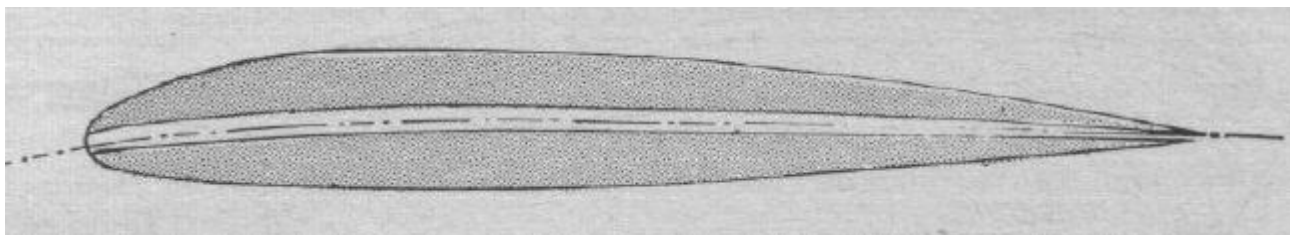


Figure II.6 profil Biconvexe dissymétrique

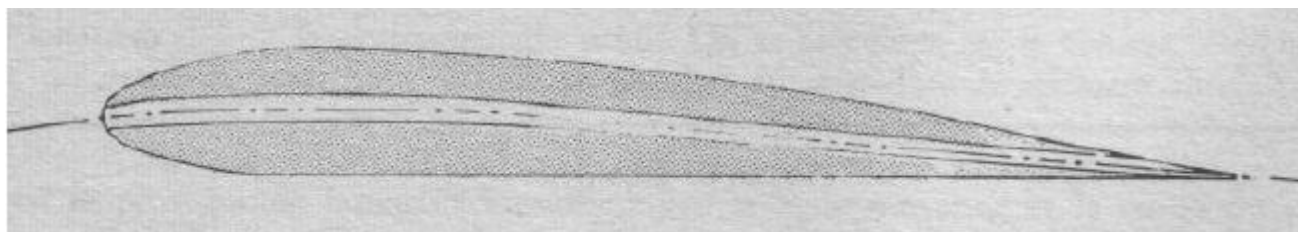


Figure II.7 profil Plan convexe

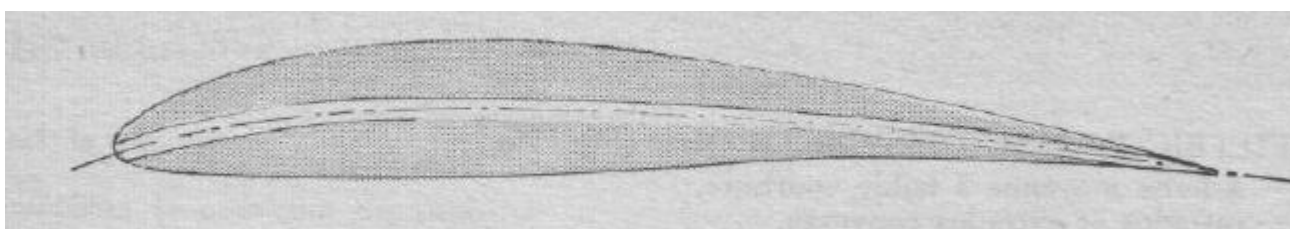


Figure II.8 Profil Creux

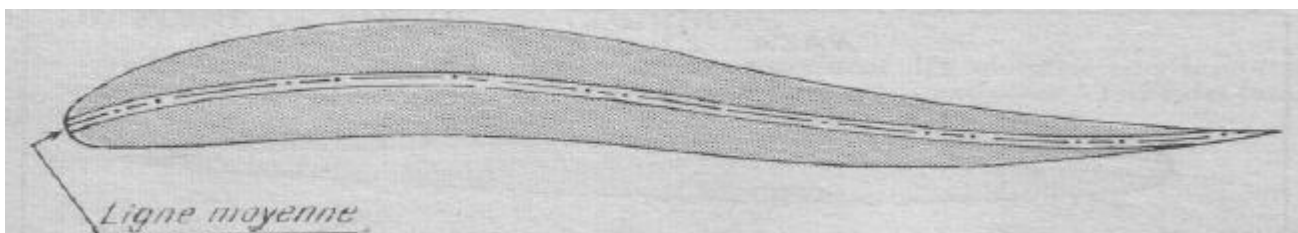


Figure II.9 Profil à Double courbure

Les profils utilisés pour la construction des pales des éoliennes rapides sont en général planes convexes ou biconvexes mais non symétrique (NACA 4412, 4415, 23012, 23015...).

Ces profils présentent des trainées réduites et permettent de ce fait, d'obtenir de bons rendements aérodynamiques.

Différents types de profils aérodynamiques sont catalogués dans le monde. On notera, par exemple, les profils Joukovski, Eppler, wortmann, NACA, RAY, Göttingen, NLR, NASA/LRC, et SANDIA, parmi ces derniers, les profils de types NACA, sont très connus.

II.3.3.2. Profils de type NACA :

Le présentateur de la NASA était le NACA (National Advisory Committee For Aeronautic). Cet organisme a étudié différentes familles de profils répondant à diverses applications. Parmi ces dernières, il faut distinguer la famille de profils à quatre chiffres, et celle à cinq chiffres [8,12].

II.3.3.2.1. Classification les Profils NACA :

Il y a plusieurs classifications des profils NACA. Les plus utilisés sont des désignations à quatre et, cinq chiffres et profil NACA laminaire. Ces chiffres dépendent les caractéristiques géométriques du profil (l'épaisseur relative, la corde et la cambrure...etc.) [16].

II.3.3.2.2. Profils NACA à quatre chiffres :

Dans cette famille, le premier chiffre indique la cambrure relative maximale en pourcentage de la corde, le deuxième indique la position de cette cambrure en pourcentage de la corde et les deux derniers chiffres indiquent l'épaisseur relative maximale, toujours en pourcentage de la corde. Par exemple : NACA 0015 est un profil symétrique d'épaisseur maximale 15 % [1-16].

II.3.3.2.3. Profils NACA à cinq chiffres :

Dans cette famille, le premier chiffre indique le coefficient de portance caractéristique, le deuxième et le troisième chiffre indiquent la position de la cambrure maximale et les deux derniers chiffres indiquent l'épaisseur relative maximale du profil.

Par exemple : NACA 23012 c'est un profil de coefficient de portance = 2, et la position de la cambrure maximale = 30 et l'épaisseur relative maximale = 12% [16].

II.3.3.2.4. Profils NACA laminaire :

Le NACA a également étudié une série de profils dont l'écoulement est laminaire sur une majeure partie de sa surface est les a désignés par un ensemble de chiffres significatifs.

Par exemple, pour NACA 66₂-215 :

- ✓ Le premier chiffre (6) représente la désignation de la série (profils laminaire).
- ✓ Le deuxième chiffre (6) représente la position de la pression minimale (60%).
- ✓ L'indice (2) est la marge au-dessus et au-dessous du coefficient de portance caractéristique pour laquelle il existe un gradient de pression favorable (0.2).
- ✓ Le (2) représente le coefficient de portance caractéristique.
- ✓ Les derniers chiffres (15) représentent l'épaisseur relative maximale (15%) [17].

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté quelques notions de base et les principaux concepts sur l'aérodynamique qui interviennent dans l'étude du comportement des structures soumises aux actions du vent.

On passe aux calculs des efforts aérodynamiques agissant sur les pales en utilisant deux théories dans le chapitre suivant pour déterminer la forme optimale, en utilisant les deux théories.

Chapitre III :
Calculs des efforts
aérodynamiques
agissant sur les pales

III.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.

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.

Ce calcul, qui permet de déterminer les efforts aérodynamiques, est nécessaire aussi bien pour estimer les performances énergétiques de l'aérogénérateur. Pour réaliser cette modélisation, deux théories aérodynamiques sont utilisées.

III.2. Théories aérodynamiques

Dans ce travail, deux théories aérodynamiques sont utilisées. La première théorie est celle de l'écoulement axial qui utilise un modèle unidimensionnel. La deuxième est la théorie de l'élément de la pale, qui tient compte de la rotation de l'air [26].

Une formulation détaillée des deux théories est présentée dans ce qui suit.

III.2.1. Théorie de l'écoulement axial :

Dans cette approche, un modèle unidimensionnel est utilisé pour exprimer l'énergie extraite du vent, avec les hypothèses suivantes [27] :

- ✓ 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 rationnellement symétrique
- ✓ L'air passe à travers le rotor sans frottement

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

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

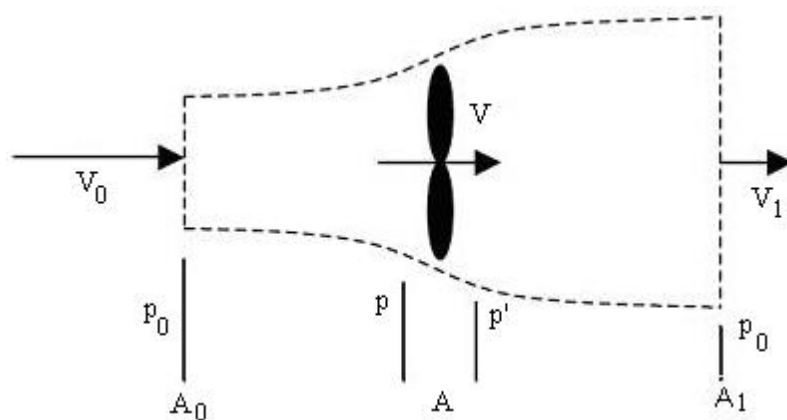


Figure III.1 : L'écoulement axial de l'air

Où :

V_i : la vitesse de l'air à la station i

A_i : 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 T sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

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

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 substituant (3.3) et (3.4), on obtient :

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

Sachant que :

$$\begin{aligned} T &= A(p - p') \\ T &= \frac{1}{2} A \rho (V_0^2 - V_1^2) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Les deux équations : (3.2) et (3.5) permettent d'écrire :

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (3.6)$$

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 :

$$P = \frac{1}{2} m(V_0^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} \rho VA(V_0^2 - V_1^2) \quad (3.7)$$

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

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} \quad (3.8)$$

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 :

$$V = (1 - a)V_0 \quad (3.9)$$

L'équation (3.6) et (3.9) sont égaux :

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} = (1 - a)V_0$$

Par simplification, On obtient :

$$V_1 = (1 - 2a)V_0 \quad (3.10)$$

En remplaçant la valeur de V_1 (3.10) dans l'équation (3.5):

$$T = \frac{1}{2} A \rho (V_0^2 - [(1 - 2a)V_0]^2)$$

En remplaçant la valeur de V_1 (3.10) et V (3.9) dans l'équation (3.7)

$$P = \frac{1}{2} \rho A (1-a) V_0 (V_0^2 - [(1-2a)V_0]^2)$$

Par simplification, on obtient :

$$T = \frac{1}{2} \rho A V_0^2 4a(1-a) \dots \dots \dots (3.11)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2 \dots \dots \dots (3.12)$$

L'expression de C_p devient :

$$C_p = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A}$$

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

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

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

Cela donne :

$$a = \frac{1}{3}$$

$$C_p = \frac{16}{27} \approx 59,3\%$$

Ainsi, le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement égal à 59.3%.

Dans la pratique ce rendement n'est jamais atteint à cause des effets suivants [27]:

- ✓ 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 pale

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 (3.1), la section de l'air balayé par le vent croît 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%**.

III.2.2. 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 hypothèses suivantes sont utilisées [28] :

- ✓ 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 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 , (voir figure III.2).

Avec :

$$dA = 2\pi r dr$$

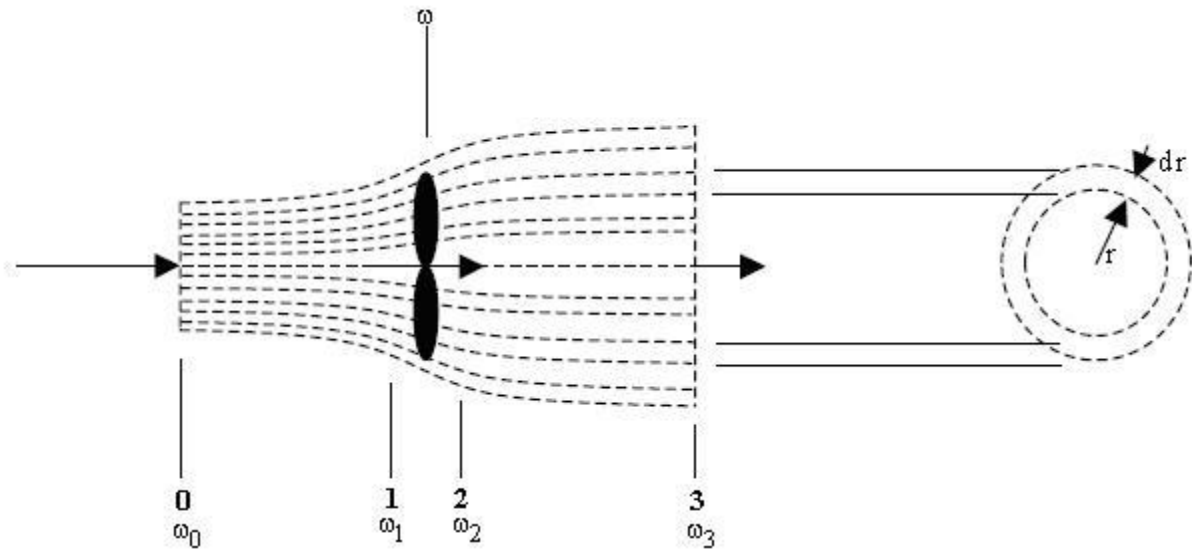


Figure III.2 : L'écoulement de l'air à travers un élément annulaire

La force axiale élémentaire est déduite de l'équation (3.11), en remplaçant la surface \mathbf{A} du rotor par la section de l'élément annulaire $d\mathbf{A}$, on obtient dans ce cas:

$$dT = 4a(1-a)\rho V_0^2 \pi r dr \quad (3.14)$$

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

$$dF_t = m dV_t = \rho V dA \omega r \quad (3.15)$$

$$dF_t = 2\pi \rho V \omega r^2 dr \quad (3.16)$$

Le couple généré dans la section annulaire est :

$$dQ = 2\pi \rho V \omega r^3 dr \quad (3.17)$$

Puisque la puissance d'un couple est :

$$P = \vec{Q} \cdot \vec{\Omega} \quad \Rightarrow \quad P = Q \Omega$$

La puissance élémentaire extraite à travers la section annulaire est:

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

Où :

ω : est la vitesse angulaire de rotation de l'écoulement de l'air dans le plan du rotor.

Ω : vitesse angulaire de rotation du rotor

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 :

$$\omega_0 = 0$$

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 :

$$\omega_1 = 0$$

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 après le rotor [29]:

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

Sachant que :

$$\omega_1 = 0 \quad \text{et} \quad \omega = a' \Omega$$

On remplaçant dans (3.23), on obtient :

$$\omega_2 = 2\Omega a' \quad (3.24)$$

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

$$\omega_2 r_2^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (3.25)$$

Etant donné que :

$$r_1 \approx r_2 \approx r_3$$

L'équation (3.25) devient :

$$\omega_2 r^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (3.26)$$

Donc :

$$\omega_3 = \omega_2 \left(\frac{r}{r_3} \right)^2 \quad (3.27)$$

En remplaçant la valeur de ω_2 de la formule (3.24) dans (3.27), on obtient :

$$\omega_3 = 2\Omega a' \left(\frac{r}{r_3} \right)^2 \quad (3.28)$$

Puisque le rayon du sillage croît en s'éloignant du rotor vers l'aval, l'équation (3.28), 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.

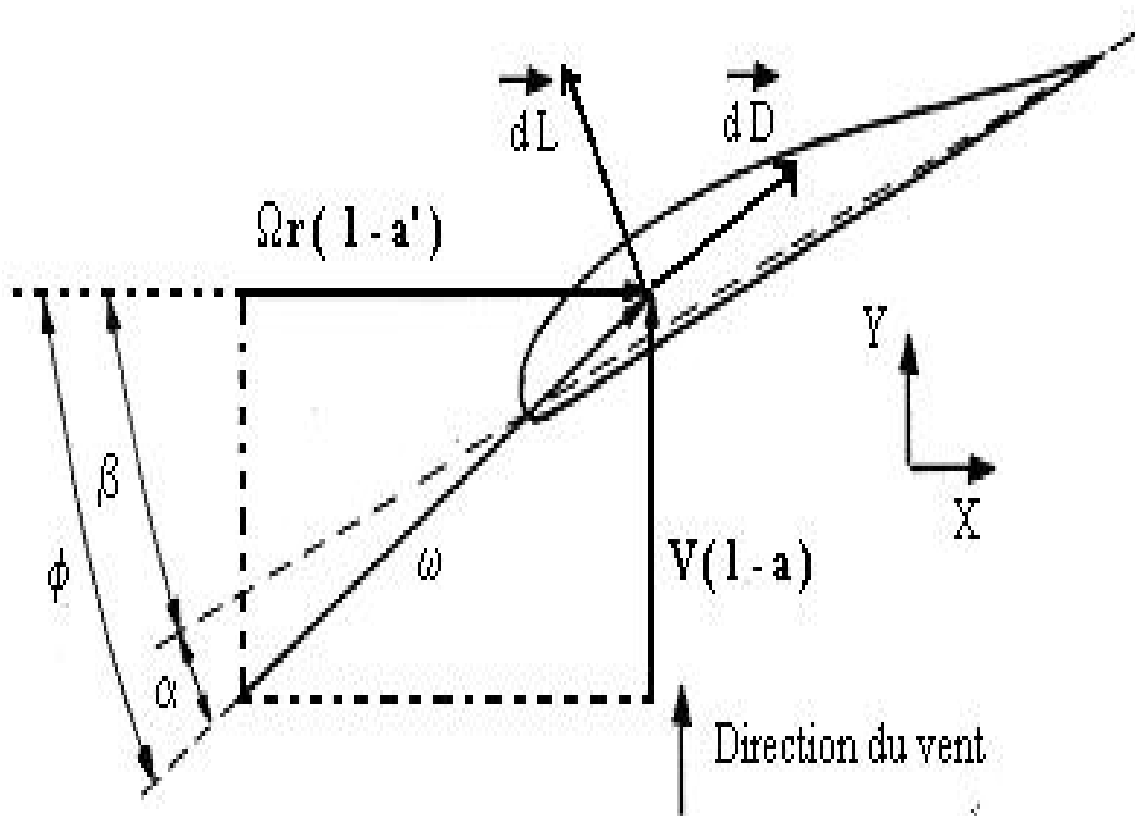


Figure III.3 Section d'un élément de la pale à un rayon r

Soit :

W : vitesse relative de l'air

c : la corde du profil au rayon local (r) de la pale

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

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.

dF_y : est la force axiale élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.

D'après la figure III.3, par projection de \vec{dL} , \vec{dD} sur $(0, \vec{X}, \vec{Y})$ on obtient :

$$C_y = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (3.34)$$

$$C_x = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (3.35)$$

On a :

$$dF_t = B dF_x$$

$$dT = B dF_y$$

Où :

B : est le nombre de pales

D'après la figure III.3, on a :

$$\alpha = \phi - \beta \quad (3.36)$$

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\Omega r} \quad (3.37)$$

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 :

$$dT = BC_y dq = BC_y \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (3.38)$$

$$dQ = BC_x dqr = BC_x \frac{1}{2} \rho W^2 c r dr \quad (3.39)$$

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

donne :

$$dT = 4a(1-a)\rho V_0^2 \pi r dr = BC_y \frac{1}{2} \rho W^2 c dr$$

$$dQ = 2\pi\rho V \omega r^3 dr = BC_x \frac{1}{2} \rho W^2 c r dr$$

Et on a d'après la figure III.3 :

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

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

On remplace W par sa valeur $W = \frac{V_0(1-a)}{\sin \phi}$ dans dT et $V = W \sin \phi$ et $\omega = 2a'\Omega$

dans dQ :

$$dT = 4a(1-a)\rho V_0^2 \pi r dr = BC_y \frac{1}{2} \rho \frac{V_0^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} c dr$$

$$dQ = 2\pi\rho W \sin \phi 2a'\Omega r^3 dr = BC_x \frac{1}{2} \rho W^2 c r dr$$

Par simplification, on obtient :

$$a\pi r = BC_y \frac{1}{8} \frac{(1-a)}{\sin^2 \phi} c$$

$$\pi \sin \phi a' \Omega r^2 = BC_x \frac{1}{8} W c$$

On remplace W par sa valeur : $W = \frac{\Omega r(1+a')}{\cos \phi}$:

$$a\pi r = BC_y \frac{1}{8} \frac{(1-a)}{\sin^2 \phi} c$$

$$\pi \sin \phi a' \Omega r^2 = BC_x \frac{1}{8} \frac{\Omega r(1+a')}{\cos \phi} c$$

Finalement :

$$\frac{a}{1-a} = \frac{cBC_y}{8\pi r \sin^2 \phi} \quad (3.40)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{cBC_x}{8\pi r \sin \phi \cos \phi} \quad (3.41)$$

Le coefficient de pleine étude locale est défini comme suit [25] :

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r} \quad (3.42)$$

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

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_y} + 1} \quad (3.43)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_x} - 1} \quad (3.44)$$

III.3. Remarque :

Certaines auteurs ([6], [7] et [8]) affirment que le coefficient de traînée doit être omis des équations (3.34) et (3.35), 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 nous oblige à prendre $C_d = 0$.

Par contre d'autres auteurs [9], continuent à inclure le terme de la traînée.

Sachant qu'avec un nombre fini de pales, la supposition que l'écoulement est rationnellement symétrique n'est pas vérifiée.

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 de « tip losses ».

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

$$F = \frac{B\Gamma}{\Gamma_{\infty}} = \frac{2}{\pi ar \cos(e^{-f})} \quad (3.46)$$

avec :

$$f = \frac{\frac{B}{2}(R-r)}{r \sin \phi} \quad (3.47)$$

Γ : est la circulation effective de la pale au rayon r .

Γ_{∞} : est la circulation d'une hélice ayant un nombre infini de pale.

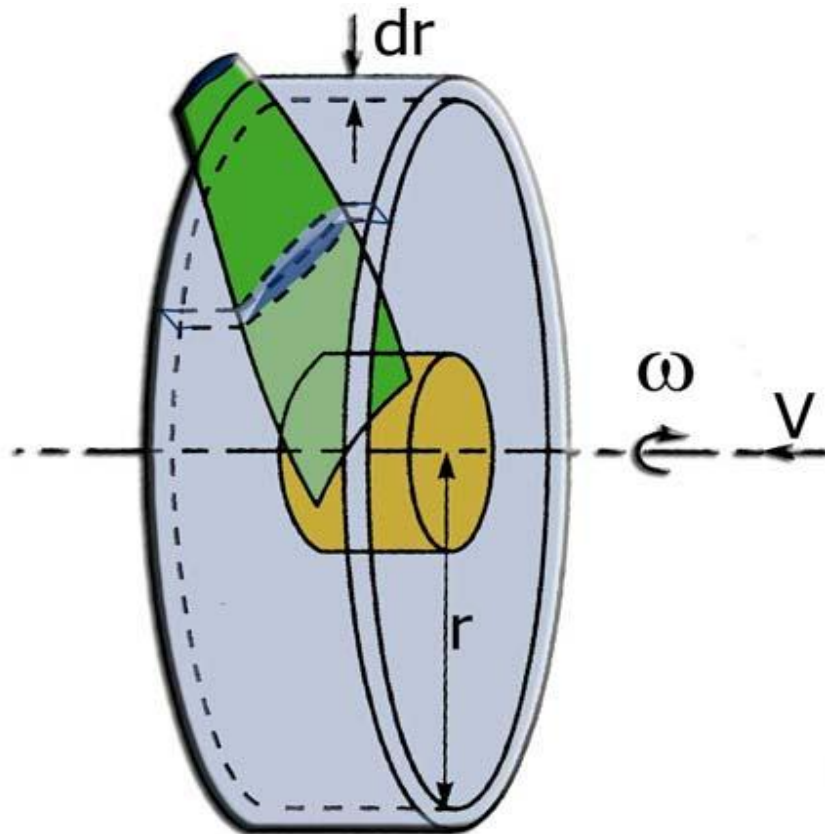
Les facteurs d'interférence axiale et tangentielle deviennent :

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

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_x} - 1} \quad (3.49)$$

Dans la pratique cette correction a très peu d'influence sur la prévision de la performance de l'éolienne et elle est souvent négligée [28].

III.4. 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 de Ω à $\Omega + \omega_2$

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

$$p - p' = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 \quad (3.51)$$

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

$$dT = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 2\pi r dr \quad (3.52)$$

Introduisant le facteur d'interférence tangentiel a' , dont l'expression est donnée par l'équation (3.24) :

$$a' = \frac{\omega_2}{2\Omega}$$

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

$$dT = 4a'(1+a')\rho\Omega^2 r^2 \pi r dr \quad (3.53)$$

La division des deux équations (3.14) et (3.53) peut donner :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{V_0^2} \quad (3.54)$$

Prenant la vitesse spécifique comme :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

Et la vitesse spécifique locale comme [25] :

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_0}$$

L'équation (3.54) devient :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \lambda_r^2 \quad (3.55)$$

L'expression de la puissance extraite dans l'équation (3.20) peut s'écrire :

$$P = 2\pi\rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (3.56)$$

Ou bien :

$$P = \frac{1}{2} \pi\rho R^2 V_0^3 \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (3.57)$$

Le coefficient de puissance C_P est formulé comme suit :

$$C_P = \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (3.58)$$

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

$$K = a'(1-a) \quad (3.59)$$

Ce coefficient atteint sa valeur maximale $C_{p \max}$ si l'expression K est maximale. Les deux équations (3.55) et (3.59) permettent d'exprimer K en fonction de a .

Le maximum de K est atteint si, on prend :

$$\frac{\partial K}{\partial a} = 0 \quad (3.60)$$

Cela implique :

$$\frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} = \lambda_r^2 \quad (3.61)$$

L'égalité des deux équations (2.55) et (2.61) permet d'écrire :

$$a' = \frac{(1-3a)}{(4a-1)} \quad (3.62)$$

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.

III.4.1. 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 (3.62), 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 (3.45) devient :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_L \cos \phi} + 1} \quad (3.63)$$

Aussi, l'expression de a' de l'équation (3.46) devient :

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L} - 1} \quad (3.64)$$

Où

C_L : est la valeur optimale du coefficient de portance [10].

Si on substitue l'expression (3.62) dans cette dernière équation, on obtient :

$$a = \frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L + 12 \cos \phi} \quad (3.65)$$

L'égalité des deux expressions de a dans les équations (3.63) et (3.65) donne l'équation quadratique suivante, dont l'inconnue est σC_L :

$$(\sigma C_L)^2 + 8 \cos \phi \sigma C_L - 16 \sin^2 \phi = 0 \quad (3.66)$$

Cette équation admet deux solutions :

$$\sigma C_L = 4(1 - \cos \phi) \quad (3.67)$$

$$\sigma C_L = -4(\cos \phi + 1) \quad (3.68)$$

La première racine n'est pas acceptable, car $\sigma C_L < 0$. La deuxième racine donnée par (3.68) donne l'expression optimale de la corde, le long de la pale :

$$C = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \phi) \quad (3.69)$$

Pour déterminer l'angle optimal ϕ et par conséquent l'angle optimal de vrillage β , des transformations similaires sont à envisager. La formule (3.37) peut s'écrire comme suit :

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{(1+a')} \frac{1}{\lambda_r} \quad (3.70)$$

Si on substitue l'expression (3.62) dans cette dernière équation, on obtient :

$$\lambda_r = \frac{(4a-1)(1-a)}{a} \frac{1}{\tan \phi} \quad (3.71)$$

La substitution de l'équation (3.63) dans (3.71) donne :

$$\lambda_r = \frac{(2 \cos \phi - 1)(1 + \cos \phi)}{(1 + 2 \cos \phi) \sin \phi} \quad (3.72)$$

Cette équation est simplifiée comme suit :

$$\lambda_r = \frac{\cos \phi + \cos 2\phi}{\sin \phi + \sin 2\phi} \quad (3.73)$$

D'où :

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2} \phi} \quad (3.74)$$

On aboutit finalement à :

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (3.75)$$

On déduit l'angle optimal de vrillage β de l'équation (3.36) :

$$\beta = \phi - \alpha_{opt} \quad (3.76)$$

Où :

α_{opt} : est l'angle d'attaque optimale, qui donne $(C_l / C_d)_{max}$.

III.4.2. Calcul des efforts aérodynamiques sur le rotor :

Une fois que la forme optimale des pales est déterminée à l'aide des formules de la section précédente, il est possible maintenant, de calculer les efforts et les moments agissant sur les pales ainsi que la puissance extraite par l'hélice.

Afin d'effectuer ce calcul, on suppose que les données suivantes sont disponibles :

- Le rayon de l'hélice **R**
- La vitesse spécifique λ
- Le nombre de pales **B**
- Les caractéristiques du profil $C_L(\alpha)$ et $C_D(\alpha)$
- Les données suivantes sont calculées par la méthode décrite dans la section précédente :
- La distribution de la corde $c(r)$
- La distribution de l'angle de vrillage $\beta(r)$

La méthode utilisée consiste à calculer les valeurs des facteurs d'interférence axial **a** et tangentiel **a'** pour chaque position **r** de la pale. Puisqu'il n'existe pas d'expressions analytiques pour ces facteurs, une méthode itérative est utilisée, elle se résume par les étapes suivantes :

1. On donne la valeur de **r** qui détermine la distance de l'élément de la pale par rapport au centre de l'hélice (où ce calcul sera effectué).
2. On suppose des valeurs initiales raisonnables pour **a** et **a'** ($a = 1/3$ et $a' = 0$ à titre d'exemple)
3. On calcule ϕ à l'aide de l'équation $\tan \phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\Omega r}$
4. On calcule α à l'aide de la formule $a = \phi - \beta$ de l'équation (3.36)
5. On détermine $C_L(\alpha)$ et $C_D(\alpha)$ pour l'angle calculé α par une méthode d'approximation en utilisant le tableau des caractéristiques du profil utilisé.
6. On calcule a et a' en utilisant les formules :(3.49) et (3.50).

7. On Compare les valeurs de \mathbf{a} et \mathbf{a}' avec celles précédentes et on répète les étapes 3 à 6 jusqu'à l'obtention de la précision voulue.

La convergence de \mathbf{a} et \mathbf{a}' veut dire que l'égalité des résultats obtenus par les deux théories est vérifiée.

8. On calcule dC_p , dQ , dT et dP
9. Si cette approche est répétée pour chaque position r de la pale, cela permettra de calculer la valeur totale de : C_p , Q , P et T par intégration numérique le long de la pale.

Si les pertes de pression au bout libre de la pale sont prises en considération, les formules adéquates doivent être utilisées.

Aussi, pour des valeurs de α où le décrochage de la pale peut avoir lieu, des solutions multiples peuvent en résulter.

L'organigramme de la **figure IV.3** résume cet algorithme de résolution.

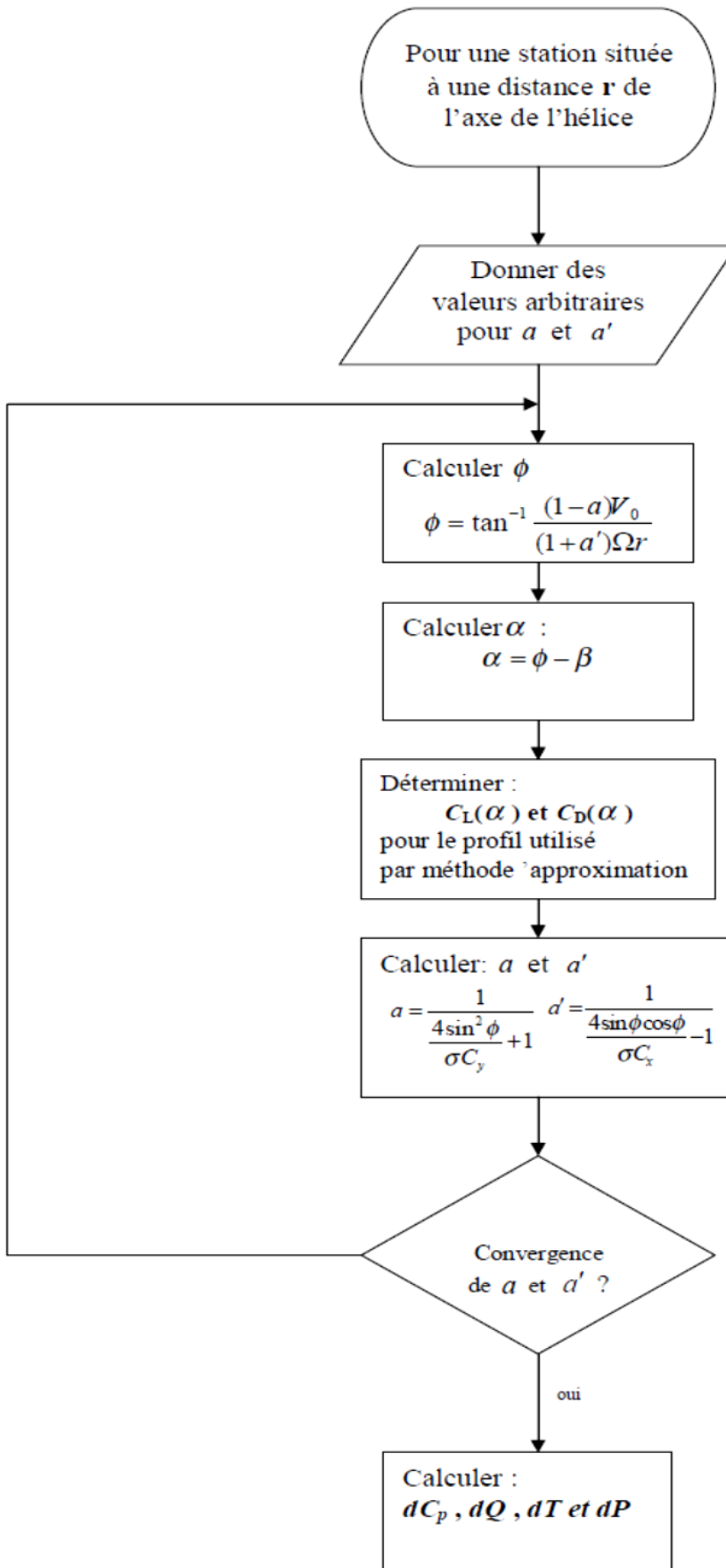


Figure III.4 Organigramme de la méthode BEM, pour le calcul statique et énergétique du rotor [16]

III.5. Conclusion :

Les efforts aérodynamiques obtenus serviront aussi bien pour estimer les performances énergétiques aussi bien que pour analyser la structure des pales éolienne.

Dans le chapitre suivant, en appliquant les équations obtenues précédemment pour calculer les efforts agissant sur la pale et on va présenter les résultats sous formes des tableaux et graphes.

Chapitre IV :
Résultats et
Interprétations

IV.1. Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous présentons des résultats de programme exécuté sous forme des tableaux et graphes de coefficient de couple et portance.

La force axiale, la force tangentielle, le moment et quelques caractéristiques concernant notre sujet étaient présentés pour comparaison.

IV.2. Résultat et interprétation :

Les résultats de la distribution optimale de la corde, ainsi que l'angle de vrillage pour deux types de pales de 5 mètres de diamètre (ayant différents profils) sont résumés par les tableaux suivants :

IV.2.1. Répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil NACA 63-421. [15]

Tab IV.1 : Distribution optimale de la corde et de l'angle de vrillage (Profil NACA 63-421) [15]

r/R	Corde (m)	Angle de vrillage (°)
0,16	0,60	19,3
0,20	0,53	15,2
0,24	0,47	12,1
0,29	0,42	9,7
0,33	0,37	7,9
0,37	0,34	6,4
0,41	0,31	5,3
0,45	0,28	4,3
0,50	0,26	3,4
0,54	0,24	2,7
0,58	0,23	2,1
0,62	0,21	1,6
0,66	0,20	1,1
0,71	0,19	0,7
0,75	0,18	0,3
0,79	0,17	0,0
0,83	0,16	-0,3
0,87	0,15	-0,6
0,92	0,15	-0,8
0,96	0,14	-1,0
1,00	0,13	-1,2

IV.2.2. Répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil. LS1-0417 :

Tab IV.2 : Distribution optimale de la corde et de l'angle de vrillage (Profil LS1-0417) [15]

r/R	Corde (m)	Angle de vrillage (°)
0,16	0,82	23,3
0,20	0,73	19,2
0,24	0,64	16,1
0,29	0,57	13,7
0,33	0,51	11,9
0,37	0,46	10,4
0,41	0,42	9,3
0,45	0,39	8,3
0,50	0,36	7,4
0,54	0,33	6,7
0,58	0,31	6,1
0,62	0,29	5,6
0,66	0,27	5,1
0,71	0,26	4,7
0,75	0,24	4,3
0,79	0,23	4,0
0,83	0,22	3,7
0,87	0,21	3,4
0,92	0,20	3,2
0,96	0,19	3,0
1,00	0,18	2,8

La figure IV.1 montre la courbe de la distribution optimale de la corde en fonction de la longueur de la pale pour une pale ayant un profil NACA 63-421.

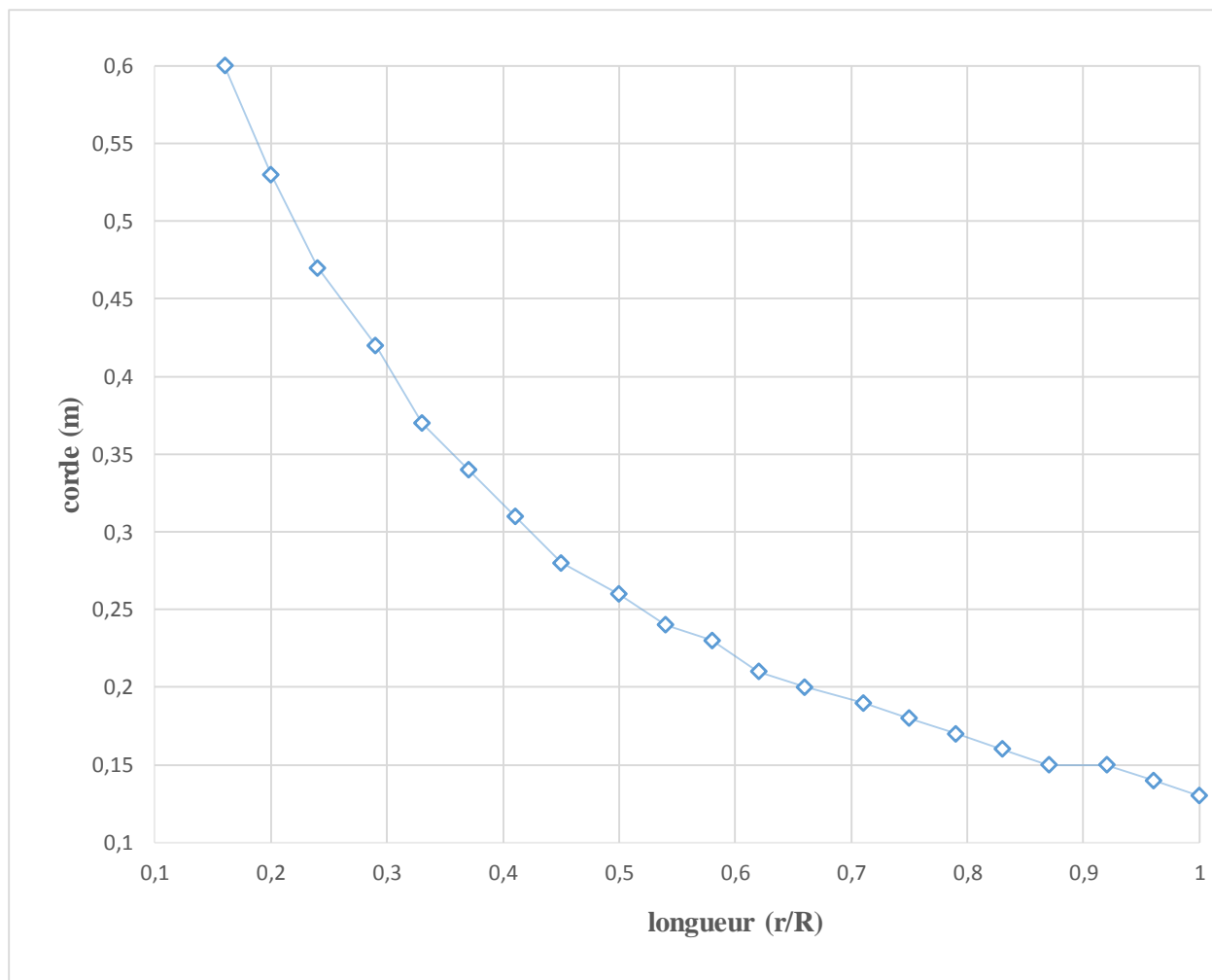


Fig. IV.1 : Distribution optimale de la corde pour une pale ayant un profil NACA 63-421

La figure IV.2 montre la courbe de la distribution optimale de l'angle de vrillage en fonction de la longueur de la pale pour une pale ayant un profil NACA 63-421.

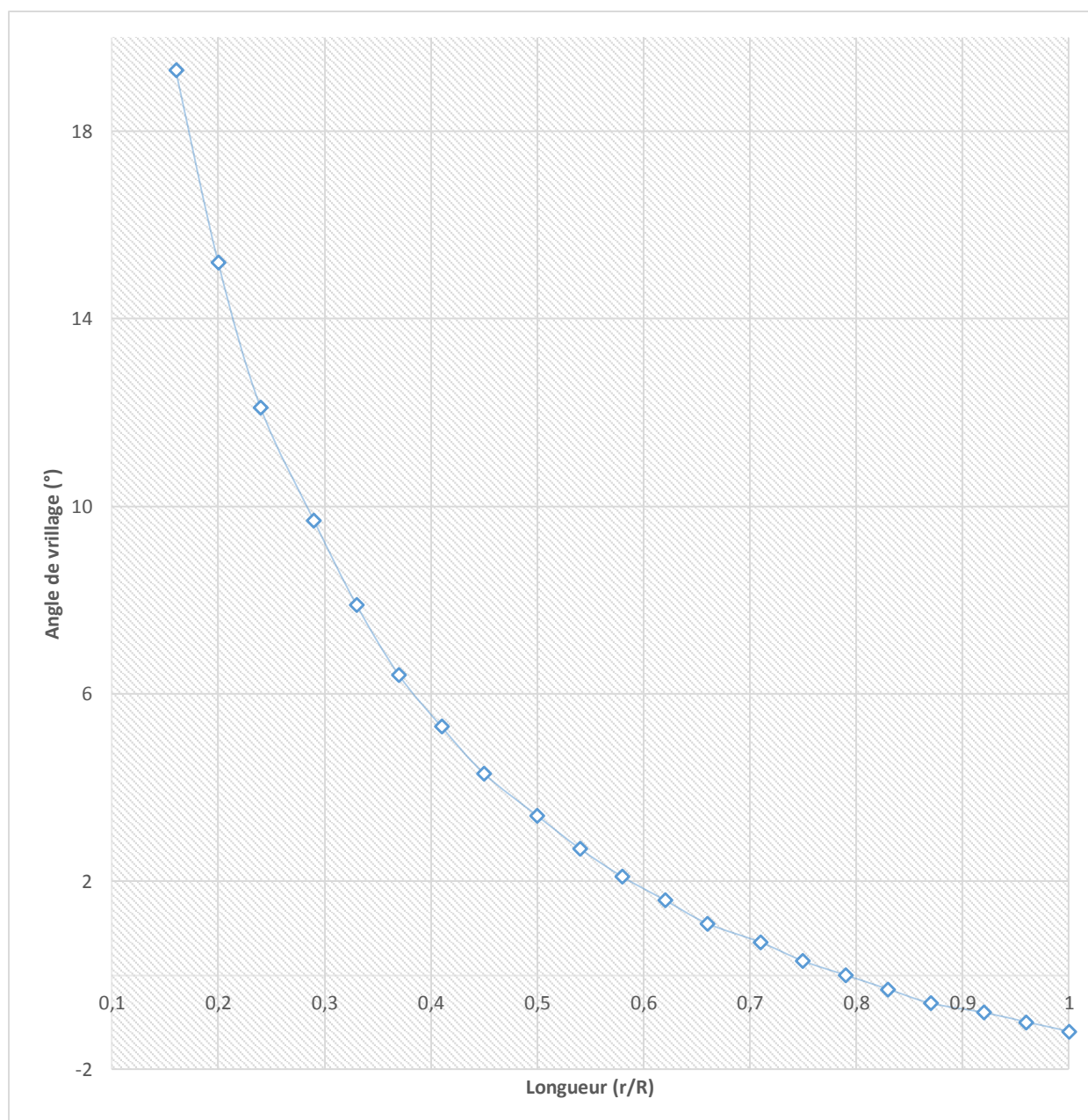


Fig IV.2 : Angle optimal de vrillage pour une pale ayant un profil NACA 63-421

La distribution calculée pour les deux paramètres, la corde et l'angle ne sont pas linéaires. Dans la pratique, ces distributions ne sont pas respectées à cause des difficultés de fabrication.

Le compromis serait d'utiliser des distributions linéaires proches de celles calculées sans trop sacrifier la performance énergétique (Fig.IV.1 et 2).

IV.2.3. Distribution des charges aérodynamique sur une pale :

Par calcul on exécute le programme et les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Table IV.3 distribution des charges aérodynamique, vitesse du vent 15 m/s, profil NACA 63-421

Station (r/R)	Force axiale	Force tangentielle(N)	Moment (N,m)
0.16	86,02	221,24	206,30
0.20	85,93	286,49	263,25
0.25	81,92	351,16	305,56
0.29	73,54	411,09	323,48
0.34	73,37	466,19	372,82
0.38	38,41	535,52	316,39
0.43	57,87	586,57	467,49
0.47	208,88	556,61	1008,82
0.51	35,67	764,83	724,62
0.56	304,36	649,67	1690,88
0.60	39,33	908,37	1120,22
0.65	354,32	759,48	2370,09
0.69	83,60	998,27	1686,21
0.73	320,40	901,37	2780,43
0.78	221,50	1012,80	2591,90
0.82	217,84	1063,01	2693,02
0.87	211,31	1109,45	2746,15
0.91	191,81	1148,48	2624,72
0.96	169,79	1181,84	2434,31
1.00	140,04	1206,90	2100,65

Pour notre étude on a pris le cas d'un profil NACA 63-421, pour une vitesse 15m/s

Force axiale totale sur pale = 553.24 N

Force tangentielle totale sur une pale = 4729.56 N

Force axiale totale sur l'hélice = 1659.724N

Moment = 8218.81 N.m

IV.2.4. Distribution de la force axiale en fonction de la longueur de la pale :

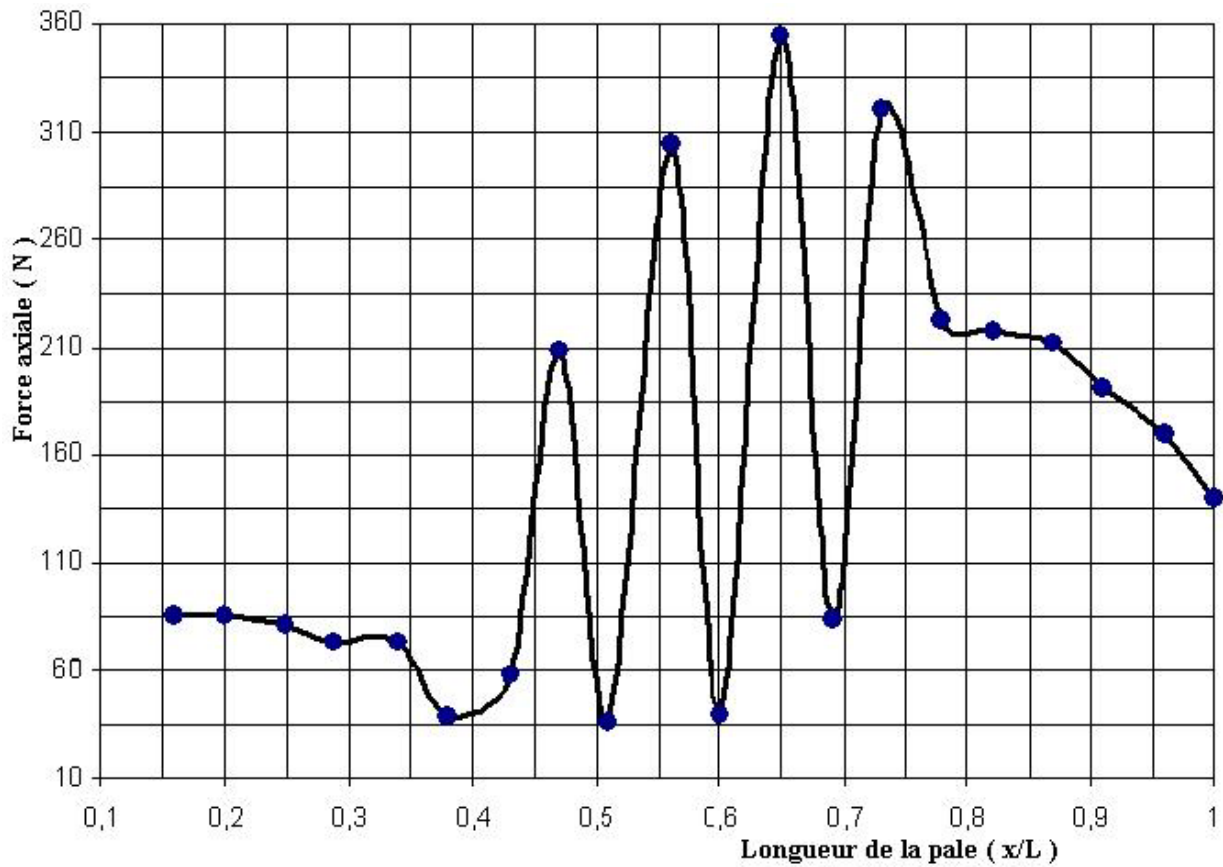


Fig.IV.3 : Distribution de l'effort axial la longueur de la pale

Nous présentons une comparaison entre les profils

Table IV.4 : Puissance extraite par un aérogénérateur tripale de 10 m de diamètre

Profil	Max (Cl/Cd)	Angle (°) d'incidence optimale	Angle de vrillage Max (°)	Puissance extraite (KW)	coefficient de puissance (Cp)
NACA 63-421	152,11	6	19	7,5	0,46
FX66-S196-V1	160,96	8	17	7,2	0,44
LS(1)-0417	125,04	2	23	6,79	0,42
S809	97,38	6	19	6,14	0,38

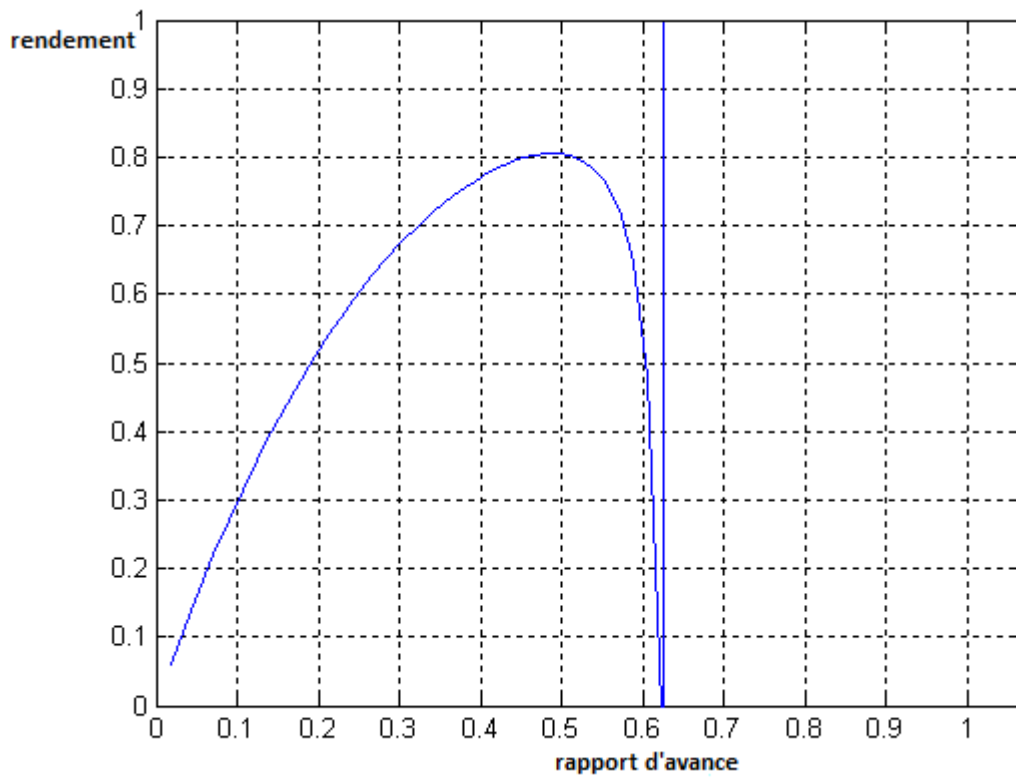


Figure IV.4 : Rendement de l'hélice

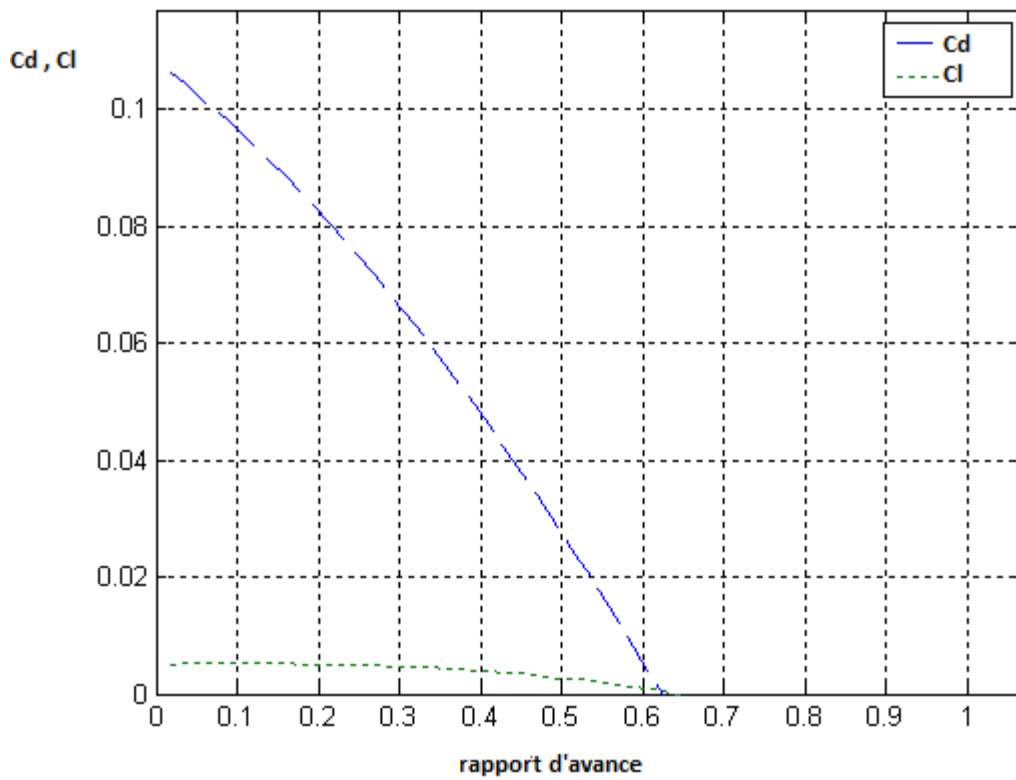


Figure IV.5 : coefficients de portance et de trainé

IV.3. Conclusion :

La méthode itérative utilisée, a pu atteindre la convergence en dépit du volume de calcul impliqué dans la formulation du problème.

Plusieurs tentatives étaient nécessaires pour trouver le bon choix des valeurs initiales des facteurs d'interférence, qui assurent la convergence de la méthode.

L'un des obstacles qui entrave l'utilisation de la méthode itérative, est la difficulté de déterminer les coefficients de portance et de traînée à cause de la variation de l'angle d'incidence à chaque itération.

Ce problème a été surmonté à l'aide d'une approximation mathématique des valeurs (obtenues expérimentalement) des coefficients de portance et de traînée en fonction de l'angle d'incidence.

Conclusion

générale

Conclusion générale :

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts, la filière éolienne occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays, et elle représente aujourd'hui une production mondiale de 60 000 MW.

Cette source d'énergie a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets et ne comporte que des risques mineurs sur l'environnement.

On peut conclure que le bilan écologique de l'énergie éolienne est très positif.

En Algérie les réalisations dans le domaine de l'énergie éolienne sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés. Aussi la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national est très faible par rapport aux pays voisins puisque elle ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité.

Dans la partie modélisation aérodynamique, la forme optimale de l'hélice d'un aérogénérateur ainsi que les efforts aérodynamiques sont estimés par la méthode BEM (Blade Element Momentum). Ces efforts serviront aussi bien pour évaluer les performances énergétiques que pour analyser la structure des pales éoliennes.

La conception optimale des pales éoliennes, pour un site donné, doit être basée sur la vitesse du vent correspondante à un maximum d'énergie récupérable (disponible).

L'algorithme de la méthode BEM (Blade Element Momentum) a pu atteindre la convergence en dépit du volume de calcul impliqué dans la formulation du problème. Plusieurs tentatives étaient nécessaires pour repérer le bon choix des valeurs initiales des facteurs d'interférence qui assure la convergence de la méthode.

Bibliographie

Bibliographie / web-graphie

- [1] **S. Lazaar, mémoire de Magister** « Contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production de l'électricité. Application aux sites de Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa » Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen.2009.
- [2] **B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed**, «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques», Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002.
- [3] **P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi**, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640.
- [4] **M. Ben medjahed** « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact sur l'environnement», mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen,
- [6] <http://www.windpower.org/fr/core.htrn>.
- [07] **ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE** «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.
- [08] **HARITZA CAMBLONG** «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [09] <http://tpeeoliennefoucauld20092010.wifeo.com>
- [11] **G. Cuntz**, Guide de l'énergie éolienne (Éolienne et aérogénérateurs). Edisud Ed. (2001).
- [12] http://www.eoltec.com/fr/Main_fr.htm
- [13] **ARMAND BOYETTE** «contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne» thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.
- [14] **Dannemand Andersen** "Review of historical and modern utilization of wind power" Wind Energy Department, Riso Laboratory.

- [15] **Z.L. Mahri** *, **M.S. Rouabah** et **S. Zid** “ Calcul des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d’une petite éolienne “ Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 241 – 256
- [16] **ION Paraschivoiu**, « Aérodynamique subsonique », Editions de l’école polytechnique de Montréal (Québec), Canada, 1998.
- [17] **R.K. Zeytounian**, « Mécanique des fluides fondamentale», Université de Lille, France, 1991.
- [18] **A. Brima**, « Mécanique des fluides et Aérodynamique», cours de Master I, Département Génie mécanique, Université de Biskra, 2012-2013.
- [19] **CHERRAD Adel Eddine**, « Etude de l’écoulement transsonique autour d’un obstacle», thèse université de Batna, 2012.
- [20] **ION Paraschivoiu**, « Aérodynamique subsonique », Editions de l’école polytechnique de Montréal (Québec), Canada, 1998.
- [21] **M.M. Duquette, K. D. Visser** “Numerical Implications of Solidity and Blade Number on Rotor Performance of Horizontal-Axis Wind Turbines” Journal of Solar Energy Engineering Nov 2003, Vol. 125 /425
- [22] **F.Bertagnolio, N.Sorensen** «Wind Turbine Airfoil Catalogue » Riso (National Laboratory, Roskilde), Denmark August 2001.
- [23] **J.M. Jonkman** “Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST_AD” National Renewable Energy Laboratory, Task No. WER3 2010 NREL/TP-500-34755 December 2003
- [24] **D.Wood** “The design and analysis of small wind turbines” University of Newcastle School of Engineering NSW 2308 Australia, 1st edition of Notes 2002
- [25] **M.M. Duquette, K. D. Visser** “Numerical Implications of Solidity and Blade Number on Rotor Performance of Horizontal-Axis Wind Turbines” Journal of Solar Energy Engineering Nov 2003, Vol. 125 /425
- [26] **E. Lysen** “Introduction to wind energy” Netherlands : Amersfort, 2nd Edition, 1983.

[27] **J.M. Jonkman** “Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST_AD” National Renewable Energy Laboratory, Task No. WER3 2010 NREL/TP-500-34755 December 2003

[28] **D.Wood** “The design and analysis of small wind turbines” University of Newcastle School of Engineering NSW 2308 Australia, 1st edition of Notes 2002

[29] **S.M. Habalia, I.A. Saleh** “Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics Part I: Design of the blade and root” Journal of Energy Conversion & Management 41 (2000) 249-280

ملخص

الهدف من عملنا هو حساب القوات الهوائية التي تمارس على الشفرة، لتحديد العلامات الأمثل الخاصة بها وتقدير الطاقة القصوى المستخرجة من هذا الجهاز

منهجيتنا هي مزج اثنين من النظريات المتمثلة في عنصر الشفرة الذي يأخذ في الاعتبار عنصر الدوران من تدفق الهواء الناتجة عن دوران شفرات وتدفق محوري بحيث إننا قادرون على حل المعادلات جهد وعزم الدوران الهوائية. هذه المهمة معقدة بسبب دوران المروحة يخلق تدفق الهواء ثلاثي الأبعاد حول الشفرات.

كلمات البحث: توربينات الرياح شفرة، عنصر شفرة، تدفق المحوري، أقصى طاقة، والشكل الأمثل

Résumé

L'objectif de notre travail est de calculer les efforts aérodynamiques qui s'exercent sur les pales, de déterminer leurs paramètres optimaux et d'estimer la puissance maximale extraite par cette machine.

Notre démarche consiste à faire une combinaison entre deux théories celle de l'élément de la pale qui tient compte de la composante de rotation de l'écoulement de l'air engendré par la rotation des pales et celle de l'écoulement axial afin qu'on puisse résoudre les équations des efforts et du couple aérodynamique. Cette modélisation est une tâche complexe à cause de la rotation de l'hélice qui crée un écoulement tridimensionnel de l'air autour de ces pales.

Mots clé : éolienne, pale, élément de pale, écoulement axial, puissance maximale d'une éolienne, forme optimale de la pale.

Abstract

The aim of our work is to calculate the aerodynamic forces exerted on the blades, to determine their optimal parameters and to estimate the maximum power extracted by this machine.

Our approach consists in making a combination of two theories: the first one of the element of the blade which takes into account the component of rotation of the air flow generated by the rotation of the blades and the second one of the axial flow, So that the equations of the forces and of the aerodynamic torque can be solved. This modeling is a complex task because of the rotation of the helix which creates a three-dimensional flow of air around these blades.

Key words: wind turbine, blade, blade element, axial flow, maximum power of wind turbine, optimal shape of blade