

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mentouri (Constantine)
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Climatique

Thèse préparée pour l'obtention d'un diplôme de doctorat d'état

THEME

**ETUDE DYNAMIQUE ET OPTIMISATION DES
PALES D'UN AEROGENERATEUR**

Spécialité : Energétique

Présentée par
Mr Mahri Zine Labidine

Directeur de thèse
Dr Rouabah M.S

Devant le jury :

Président : Pr Belhamri A.
Rapporteur : Dr Rouabah M.S
Examineurs : Pr Ayadi A.
Dr Benmansour T.
Dr Omara A.

Université de Mentouri (Constantine)
Université de Mentouri (Constantine)
Centre Universitaire de Oum El Bouaghi
Université de Mentouri (Constantine)
Université de Skikda

Liste des symboles

Partie aérodynamique

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_o}	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
l	vitesse spécifique (Tip speed ratio)
l_r	vitesse spécifique locale
Ω	vitesse angulaire de rotation du rotor
w	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.
f	angle d'écoulement
s	coefficient de pleinétude local (local solidity)

Partie structure

E	module d'élasticité
F	force aérodynamique
G_n	force centrifuge au nœud n
$G.J$	rigidité de torsion
I	moment d'inertie de la section
L	longueur de la pale
L_A	moment aérodynamique.
l	longueur de l'élément de la pale
m	masse linéaire
M_n	moment fléchissant au nœud n
$S(x)$	fonction de forme (mode propre)
t	temps
V_n	effort tranchant au nœud n
x	abscisse de l'axe de la pale
Z_n	déflexion au nœud n
ω	fréquence naturelle
j	fonction de temps (mode de réponse)
θ	angle de torsion.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

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 connue 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. 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.

L'étude présentée dans cette thèse a pour objectif d'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 et des rafales qui engendrent des efforts extrêmes, favorisant ainsi la fatigue des pales. Cette fatigue est l'un des problèmes sérieux pouvant entraver le bon fonctionnement de l'éolienne.

Cette étude est introduite par une revue de l'aspect économique et écologique de l'énergie éolienne, dans le premier chapitre, mettant ainsi l'accent sur la place qu'occupe cette filière énergétique dans le monde.

Ensuite, une modélisation aérodynamique de l'hélice est effectuée, dans le deuxième 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 engendrée par la rotation des pales. La combinaison des deux approches permet de résoudre les équations des efforts et des couples aérodynamiques par méthode itérative.

Dans la troisième partie de ce travail une analyse modale de l'hélice est effectuée. Ce calcul modal permet d'obtenir les fréquences et les modes propres des pales.

En se basant sur les résultats précédents une analyse dynamique est effectuée permettant de calculer les contraintes dynamiques qui agissent sur les pales.

L'analyse du comportement dynamique des pales d'un aérogénérateur constitue aussi l'un des processus les plus importants dans la conception de cette machine, car elle permet de prévoir les problèmes de structure.

Pour le calcul modal et dynamique, deux différentes approches sont utilisées. La première est basée sur la résolution numérique de l'équation du mouvement de la pale; dans cette modélisation la pale est considérée comme un système continu.

La deuxième approche est une modélisation par éléments finis, effectuée pour une pale ayant une forme géométrique complexe.

Une fois que les contraintes dynamiques sont déterminées, la fatigue est estimée à l'aide de la théorie de Miner qui porte l'appellation de : "la règle du dommage linéaire cumulé".

Cette théorie s'applique pour des éléments soumis à des contraintes cycliques, dont l'amplitude est variable. Elle repose sur l'hypothèse, qu'à chaque cycle de fonctionnement, un certain pourcentage de la durée de vie est consommé.

Cette méthode doit être basée sur une modélisation statistique des vitesses du vent, pour le site en question, afin de déterminer le nombre de cycles de fonctionnement correspondant à chaque vitesse du vent.

Enfin, la dernière partie de ce travail est réservée à une modélisation statistique des vitesses du vent relative à plusieurs sites en Algérie.

La distribution statistique des vitesses du vent (densité de probabilité) et celle des puissances disponibles sont tracées pour plusieurs villes algériennes, en utilisant les données météorologiques de chaque ville. Ces distributions sont utiles pour l'estimation des ressources éoliennes de chaque site ainsi que pour le calcul de la fatigue.

La distribution statistique théorique de Weibull, qui donne généralement une bonne approximation de la plupart des histogrammes des vitesses de vent, est aussi déterminée pour chaque site. Ce calcul consiste à estimer les deux paramètres qui définissent la fonction analytique de cette distribution.

On note finalement que ce thème est un sujet d'actualité, vu que la rentabilité économique et commerciale de l'énergie éolienne est finalement confirmée, en plus ce domaine est relativement peu exploré. Aussi l'impact favorable de l'utilisation de l'énergie éolienne sur l'environnement n'est pas à négliger, car l'importance du coût écologique dans notre temps moderne n'est pas moindre que d'autres coûts économiques.

Première partie
Introduction à l'énergie éolienne

Chapitre 1
Aspects économiques et écologiques de l'énergie éolienne

Chapitre 1

Aspects économiques et écologiques de l'énergie éolienne

1.1. Généralités sur l'énergie éolienne

1.1.1 Historique

L'idée d'exploiter l'énergie du vent date depuis l'antiquité, en effet des anciennes civilisations ont connu l'exploitation de l'énergie du vent (les perses, les égyptiens et les chinois). A partir du 12^{ème} siècle, les moulins à vent firent leur première apparition en Europe et au cours des siècles qui suivirent, cette « technologie » se répandit à travers le monde. Ces moulins à vent (aéromoteurs) étaient économiquement rentables et ils ont contribué au développement économique de l'Europe par la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau, le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....)

A partir du 19^{ème} siècle ces applications commencent à perdre leur intérêt, cela est dû à l'évolution technologique qu'a connue l'Europe pendant la révolution industrielle.

Devant la montée de la combustion du charbon, l'éolien a en pratique disparu de la carte.

Après le premier choc pétrolier, des efforts pour développer à nouveau l'énergie éolienne ont été consentis, et le monde occidental se mit une fois de plus à investir dans la ressource éolienne, cette fois-ci dans le but de produire de l'électricité.

Vers le début des années 1980, les budgets de recherche et développement accordé à cette énergie « redécouverte » ont littéralement explosé dans certains pays comme l'Allemagne, les Etats-Unis, le Danemark et l'Espagne.

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.

En plus des investissements dans le domaine éolien, certains pays ont adopté une législation incitative visant à promouvoir ce secteur. Dans certains pays, ces mesures étaient assez efficaces pour faire naître une véritable industrie éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis des réductions de coûts, cette filière est aujourd'hui compétitive avec d'autres filières traditionnelles et occupe une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays.

1.1.2 Classification des éoliennes

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

a) Eoliennes à axe horizontal

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

Parmi cette catégorie, on distingue:

┆ Les éoliennes lentes:

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

Ces éoliennes sont utilisées comme des aéromoteurs notamment pour le pompage.

┆ Les éoliennes rapides:

A l'inverse des éoliennes lentes, les éoliennes rapides (les monopales, les bipales, et les tripales) doivent parfois être lancées par un moteur électrique; cependant, une fois lancées, elles rendent l'énergie consommée au démarrage.

Si la vitesse du vent est élevée les vibrations sont trop importantes et risquent de briser les pales, pour cela l'éolienne est freinée puis arrêtée à une vitesse de l'ordre de 20 à 25 m/s. Ces éoliennes rapides conviennent mieux à la production d'électricité.

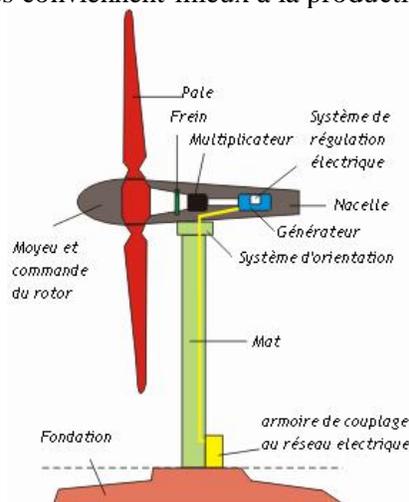


Figure 1.1 éolienne à axe horizontal

C'est ce type d'éolienne qui fait l'objet de ce travail, et dont l'objectif est l'étude de l'hélice du point de vue dynamique et aérodynamique.

b) Éoliennes à axe vertical (Perpendiculaire au vent)

Ce type d'éolienne est caractérisé par son axe vertical. Il utilise le principe de fonctionnement omnidirectionnel, qui a l'avantage de capter les vents d'où qu'ils viennent, sans besoin de mécanisme d'orientation.

Un autre avantage dans ce type d'éolienne est la taille des pales, qui n'est pas aussi contraignante, comparée à celle du type à axe horizontal.

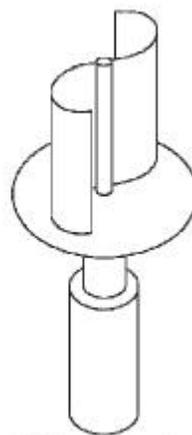
Plusieurs modèles d'éoliennes à axe vertical ont été conçus, mais les deux modèles les plus célèbres sont ceux de Darrieus et de Savonius.

Tous les modèles de cette catégorie sont restés au stade du prototype, car elles ne sont pas rentables actuellement, mais tous témoignent d'ingéniosité.

Avec la faillite du dernier fabricant, Flowind (USA), les éoliennes à axe vertical ne sont pratiquement plus fabriquées aujourd'hui, mais elles feront encore rêver longtemps les ingénieurs car leur simplicité est attrayante.



L'éolienne Darrieus



L'éolienne Savonius

Figure 1.2 éoliennes à axe vertical

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 1.1 donne plus de détails sur le développement des différentes sources énergétiques.

Tableau 1.1 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¢ le kWh, soit une baisse de l'ordre de 90% [5].

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

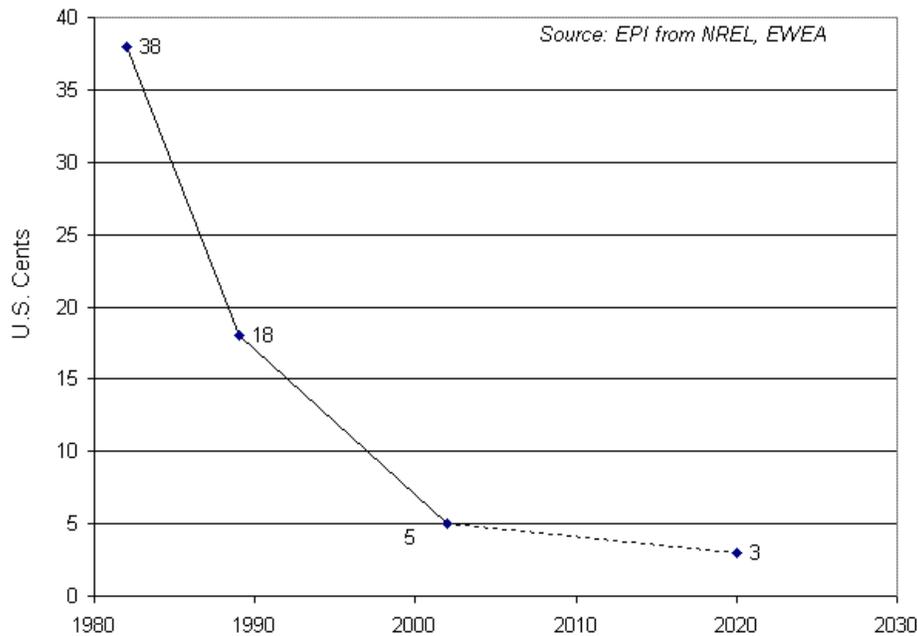


Figure 1.3 Coût moyen du KWH éolien [5]

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].

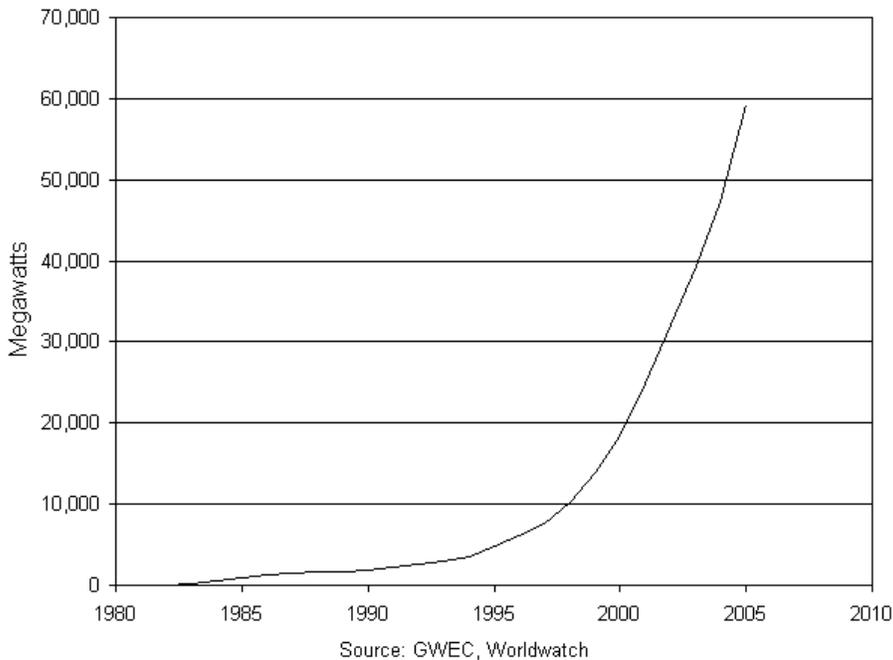


Figure 1.4 Progression de la capacité mondiale de production de l'électricité éolienne [6]

1.3 Situation actuelle de L'énergie éolienne dans le monde :

La situation de l'énergie éolienne dans les différentes régions du monde peut être récapitulée comme suit :

1.3.1 En Europe:

§ **L'Allemagne**, est le premier pays au monde dans ce domaine et qui possède la plus grande capacité installée (18.400 MW), et obtient maintenant 6 pour cent de son électricité de l'énergie du vent. Ce chiffre devrait passer à 20% d'ici 2020.

Selon l'Union fédérale de l'énergie éolienne (BWE), les exportations allemandes de turbines éoliennes ont augmenté de 55% en 2005 par rapport à 2004.

En Allemagne, l'éolien a permis de réduire les émissions de CO₂ de 24,6 millions de tonnes.

La R&D dans le domaine de l'énergie éolienne est particulièrement développée, l'Allemagne dispose actuellement de plusieurs Centres de recherche spécialisés.

§ **L'Espagne**, occupe la deuxième place avec plus de 10.000 mégawatts de capacité, elle obtient 8 % de son électricité du vent.

Au courant des dernières années, l'industrie éolienne espagnole a connu une croissance remarquable, en combinant des efforts dans le domaine de transfert technologique et achat de licence avec la recherche et développement locale.

Les entreprises espagnoles Gamesa et Ecotecnia développent actuellement un grand projet de recherche industriel subventionné par le Gouvernement et dont l'objectif principal est de maintenir l'Espagne à l'avant-garde de la technologie éolienne. Windlizer 2015 est un grand projet de fabrication de nouvelles machines de grande puissance pour dominer le marché éolien à partir de 2015.

§ Le Danemark est classé cinquième dans le monde en matière de puissance installée (3.100 mégawatts), mais occupe la première place mondiale dans un classement relatif par rapport à sa production en énergie électrique, car 20% son besoin d'électricité est assuré par les aérogénérateurs. Le Danemark est aussi le leader mondial dans installations éoliennes offshore, avec 400 mégawatts de capacité existante. Mondialement, plus de 900 mégawatts de puissance éolienne offshore seraient installée vers la fin de 2006, entièrement en Europe.

Grâce à une stratégie claire et efficace, le Danemark ce petit pays scandinave, est devenu aujourd'hui le géant mondial de l'industrie éolienne, occupant 60% du marché mondial. Le chiffre d'affaire global danois, concernant l'industrie éolienne, est de 3 Milliards d'Euros par année. Cinq des dix plus grandes firmes mondiales, productrices de turbines éoliennes, sont danoise.

1.3.2 En Amérique :

§ Les Etats-Unis a installé une puissance éolienne d'une capacité de 9.100 mégawatts. L'industrie éolienne américaine a battu un record en installant en 2005 une puissance éolienne de 2.400 mégawatts comparée à 370 mégawatts installée en 2004 et 1.700 mégawatts en 2003 (voir Table 1.2). Cette augmentation inattendue est due principalement à des mesures fiscales incitatives.

§ Au Canada la capacité éolienne installée est de 680 mégawatts à la fin de 2005, elle est supposée augmenter à 1.200 mégawatts vers la fin de 2006. Le gouvernement fédéral de Canada vise l'installation de 4000 mégawatts d'énergie du vent vers 2010.

1.3.3 En Asie :

Les pays asiatiques ont installé une puissance éolienne d'environ 7000 mégawatts pour produire de l'électricité. L'Inde avec 4400 mégawatts de capacité, est classé quatrième après l'Allemagne, les États-Unis, et l'Espagne. En Chine, la puissance installée actuellement est de 1260 mégawatts, et commence à se développer grâce à sa nouvelle loi sur les énergies renouvelables. Cette loi offre des incitations fiscales et des subventions à l'industrie éolienne et cible le développement de 30.000 mégawatts de puissance éolienne vers l'an 2010.

1.3.4 En Afrique :

Le Maroc, la Tunisie, l'Algérie, l'Égypte, le Sénégal et la Mauritanie, étudient de près ou réalisent déjà des projets éoliens.

§ L'Algérie:

Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables, et particulièrement dans la filière éolienne, sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés.

L'utilisation de cette source d'énergie se limite aux éoliennes (aéromoteurs) installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau [1].

Pour les futures réalisations, un projet d'une ferme éolienne à Tindouf d'une puissance de 10 MW a fait récemment l'objet d'un appel d'offres. Ce projet hybride combine le diesel et l'énergie éolienne pour la production de l'électricité (dont 6 MW en éolienne et 4 MW en diesel) [2]. Trois autres projets de centrales éoliennes de 10 MW chacune seront lancés dans le sud du pays.

Ces projets s'inscrivent dans un programme de développement des énergies renouvelables, adopté par la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG). L'objectif est de porter la part des énergies renouvelables dans le bilan électrique national à 5 ou 6 % vers l'horizon 2010-2015. Ce chiffre paraît ambitieux si l'on considère le taux actuel, qui ne représente que 0,02%, soit l'équivalent de moins de 5 GWh. Ce taux est très faible, même par rapport aux pays voisins [3].

Le recours aux énergies renouvelables est indispensable pour tout développement durable, en particulier dans le sud algérien, car la dispersion de la population dans cette région très vaste, rend le raccordement au réseau électrique très coûteux.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année.

La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations à cause de l'augmentation de cette demande.

Il est évident que les hydrocarbures ne représentent pas une solution à long terme et que le potentiel de l'énergie éolienne ouvre une voie vers une solution sûre et respectueuse de l'environnement, particulièrement après que les études ont montré l'existence d'un gisement éolien important dans certaines régions du pays [4].

§ Le Maroc :

Pour réduire sa dépendance énergétique, le Maroc s'est orienté entre autres vers le développement des sources d'énergies renouvelables notamment l'énergie éolienne. En effet, le Maroc, par sa situation géographique favorable, dispose d'un potentiel éolien important estimé à environ 6 000 MW [10].

Le Maroc a réalisé en collaboration avec des entreprises européennes plusieurs projets éoliens. Parmi eux le parc éolien de A.Torres près de Tétouan qui contient 84 éoliennes avec une puissance totale de 50,4 MW destinées à couvrir la consommation de 400.000 habitants [11] et le projet de Cap Sim Essaouira, dont la production est de 60 MW, qui est opérationnel depuis le début 2006.

Un autre projet à Tanger sera achevé, au courant de l'année 2007, et permettrait la production de 140 MW.

ONE (l'office national de l'électricité marocain) et l'entreprise espagnole Iberdrola ont signé un accord pour développer de nouvelles fermes éoliennes au Maroc [12].

Pour l'heure actuelle, c'est le Maroc qui assure la production la plus importante d'énergie éolienne en Afrique.

§ La Tunisie:

Le premier site d'éolien a été réalisé en 2000 à Sidi Daoud, au Cap Bon, avec une capacité de 8,7 mégawatts (MW). Une extension de ce site permettra selon les spécialistes d'atteindre, en 2007, la puissance de 34 MW.

La réalisation de trois nouvelles fermes éoliennes est prévue entre 2008 et 2009. Ce projet aura une capacité totale de 120 MW et permettra une économie de 134.000 Tep (tonnes équivalent pétrole), épargnant par la même, l'émission de 330.000 tonnes de gaz polluants. Suite à cette réalisation la Tunisie occupera le deuxième rang en Afrique avec une puissance totale installée de 180 MW [13].

Tableau 1.2 Capacité de la production éolienne en électricité par pays (Megawatts)
(1995-2005) [5]

Année	Allemagne	Espagne	U.S.A	Inde	Danemark	Autres pays
1995	1.130	140	1.612	576	637	683
1996	1.548	230	1.614	820	835	1.023
1997	2.080	512	1.611	940	1.120	1.373
1998	2.872	822	1.770	1.015	1.433	2.238
1999	4.445	1.522	2.500	1.077	1.748	2.638
2000	6.113	2.502	2.566	1.167	2.300	3.802
2001	8.754	3.337	4.275	1.407	2.417	4.740
2002	12.001	4.830	4.685	1.702	2.880	5.939
2003	14.609	6.202	6.374	2.110	3.110	7.026
2004	16.629	8.263	6.740	3.000	3.117	9.971
2005	18.428	10.027	9.149	4.430	3.122	13.928

1.4 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]:

1.4.1 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 fort, 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.

1.4.2 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.

1.4.3 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 affectionnent se poser 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 risques 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.

1.4.4 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].

1.5 Conclusion

La filière éolienne est probablement la plus grande réussite parmi les technologies 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.

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.

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. La part des énergies renouvelable dans le bilan énergétique national est très faible, puisque elle ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d'électricité.

Référence :

- [1] S.BENTOUBA « Les énergies renouvelables dans le cadre d'un développement durable en Algérie » SIPE8, 11 et 12 Nov 06 Bechar.
- [2] La Tribune (Alger) 17 décembre 06
- [3] Atelier de réflexion sur la stratégie de développement et à l'avenir des énergies renouvelables en Algérie, décembre 2006.
- [4] L. Aiche-Hamane et A. Khellaf « Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie » Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003)147-152
- [5] http://www.earth-policy.org/Updates/2006/Update52_data.htm
- [6] Hans Larsen, L.S. Peters "New and emerging technologies (options for the future)" Risø National Laboratory October 2002
- [7] Joseph Florence "Global wind power expands in 2006", Earth Policy Institute
- [8] P.E. Morthorst "Economics of wind power" Risø international energy conference: Energy technologies for post Kyoto targets in the Medium Term Risø national laboratory 19 - 21 may 2003
- [9] Gaëtan Lafrance « La sécurité énergétique et la filière éolienne » avis d'expert présenté au ministre des ressources naturelles, de la faune et des parcs (Québec),

Nov 2004.

[10] B. Taya, L. Chaguer « énergie éolienne au Maroc » FIER' 2002 Tétouan - Maroc

[11] Science et Vie, février 99

[12] Site Internet : <http://resosol.org/Developpement/actualite2006.html>

[13] La Presse (Tunis), 14 décembre 2006.

[14] Dannemand Andersen "Review of historical and modern utilization of wind power"
Wind Energy Department, Riso Laboratory.

Deuxième partie
Calcul Aérodynamique

Chapitre 2

Calcul des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une éolienne

Chapitre 2

Calcul des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une éolienne

2.1 Introduction

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

Pour les petites éoliennes, où le coût du kilowatt reste encore élevé et le site d'implantation est généralement imposé, la modélisation aérodynamique prend une importance particulière. Cette modélisation a pour objectif de déterminer les paramètres géométriques optimaux de la pale (permettant de capter une puissance maximale), de calculer les efforts aérodynamiques ainsi que la puissance extraite.

Des calculs très poussés doivent être menés dans le but de déterminer ces paramètres à savoir la longueur de la corde, l'angle de vrillage ainsi que l'épaisseur à chaque station de la pale.

Ensuite les efforts aérodynamiques ainsi que la puissance captée sont calculés. Ce calcul est nécessaire aussi bien pour estimer les performances énergétiques de l'aérogénérateur, que pour prévoir les problèmes de structure.

La modélisation aérodynamique de l'hélice est une tâche complexe à cause de l'écoulement tridimensionnel de l'air autour des pales.

Pour réaliser cette modélisation, deux théories aérodynamiques sont utilisées en admettant plusieurs simplifications.

2.2 Théories aérodynamiques

Dans ce travail, deux théories aérodynamiques sont utilisées en acceptant plusieurs simplifications. La première théorie est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory) qui utilise un modèle unidimensionnel. La deuxième est la théorie de l'élément de la pale (blade element theory), qui tient compte de la rotation de l'air.

Les deux approches doivent être combinées dans le but de déterminer tous les paramètres nécessaires pour dimensionner les pales [1].

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

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

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

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

2.2.1 La théorie de l'écoulement axial (the axial momentum Theory) :

Dans cette approche, un modèle unidimensionnel est utilisé pour exprimer l'énergie extraite du vent, avec les hypothèses suivantes [2]:

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

• L'air passe à travers le rotor sans frottement.

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

$$V_0 A_0 = V A = V_1 A_1 = V_i A_i \quad (2.1)$$

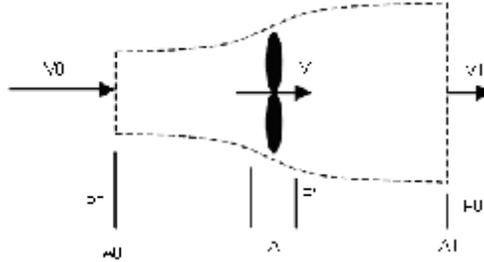


Figure 2.1: L'écoulement axial de l'air

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 sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

$$T = \dot{m}(V_0 - V_1) = \rho A V (V_0 - V_1) \quad (2.2)$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.3)$$

Et celle en aval :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p' + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.4)$$

En combinant (2.3) et (2.4) , on obtient:

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

Sachant que :

$$\begin{aligned} T &= A(p - p') \\ T &= \frac{1}{2} A \rho (V_0^2 - V_1^2) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Les deux équations : (2.2) et (2.5) permettent d'écrire :

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (2.6)$$

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 :

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}(V_0^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} rVA(V_0^2 - V_1^2) \quad (2.7)$$

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

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} rV_0^3 A} \quad (2.8)$$

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 :

$$V = (1-a)V_0 \quad (2.9)$$

En utilisant l'équation (2.6):

$$V_1 = (1-2a)V_0 \quad (2.10)$$

En substituant V_1 et V dans (2.5), on obtient:

$$T = \frac{1}{2} rAV_0^2 4a(1-a) \quad (2.11)$$

$$P = \frac{1}{2} rAV_0^3 4a(1-a)^2 \quad (2.12)$$

L'expression de C_p devient :

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.13)$$

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 :

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

$$C_p = \frac{16}{27} \approx 0,59259$$

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 [2]:

- 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 $\frac{2}{3}$.

D'après l'équation de continuité(2.1), 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 $\frac{2}{3}$ 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%.

2.2.2 La 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 [3] :

- 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 w , 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 , avec $dA = 2\pi r dr$ (voir Figure 2.2).

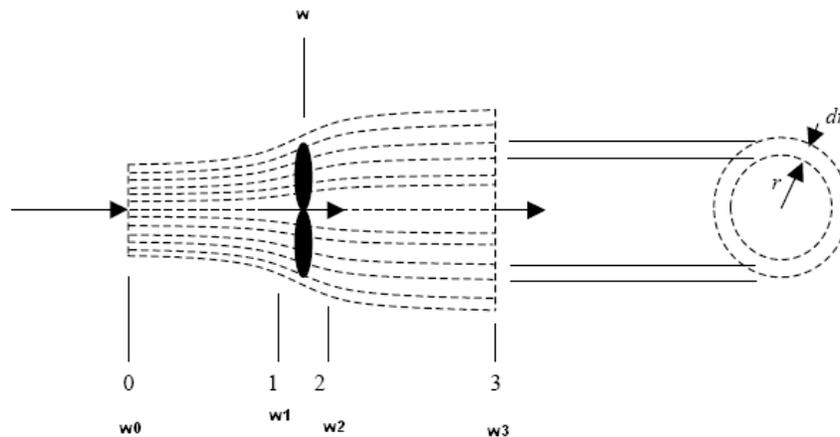


Figure 2.2: L'écoulement de l'air à travers un élément annulaire

La force axiale élémentaire est déduite de l'équation (2.11), en remplaçant la surface A du rotor par la section de l'élément annulaire dA , on obtient dans ce cas:

$$dT = 4a(1-a)rV_0^2 \rho r dr \quad (2.14)$$

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

$$dF_t = \dot{m} dV_t = rV dA \omega r \quad (2.15)$$

$$dF_t = 2\rho r V \omega r^2 dr \quad (2.16)$$

Le couple généré dans la section annulaire est:

$$dQ = 2\rho r V \omega r^3 dr \quad (2.17)$$

Puisque la puissance est:

$$P = Q\Omega$$

La puissance élémentaire extraite à travers la section annulaire est:

$$dP = 2\rho r \Omega V \omega r^3 dr \quad (2.18)$$

Où :

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

Le couple total et la puissance totale deviennent :

$$Q = 2\rho r \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (2.19)$$

$$P = 2\rho r \Omega \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (2.20)$$

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

$$w = a'\Omega \quad (2.21)$$

Puisque l'écoulement de l'air en amont, loin du rotor est purement axial, on a :

$$w_0 = 0$$

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 :

$$w_0 r_0^2 = w_1 r_1^2 \quad (2.22)$$

Cela implique que :

$$w_1 = 0$$

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 [4]:

$$w = \frac{w_1 + w_2}{2} \quad (2.23)$$

Donc :

$$w_2 = 2\Omega a' \quad (2.24)$$

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

$$w_2 r_2^2 = w_3 r_3^2 \quad (2.25)$$

Etant donné que :

$$r_1 \approx r_2 \approx r$$

L'équation (2.25) devient :

$$w_2 r^2 = w_3 r_3^2 \quad (2.26)$$

Donc :

$$w_3 = w_2 \left(\frac{r}{r_3} \right)^2 \quad (2.27)$$

$$w_3 = 2\Omega a' \left(\frac{r}{r_3} \right)^2 \quad (2.28)$$

Puisque le rayon du sillage croît en s'éloignant du rotor vers l'aval, l'équation (2.28), 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.

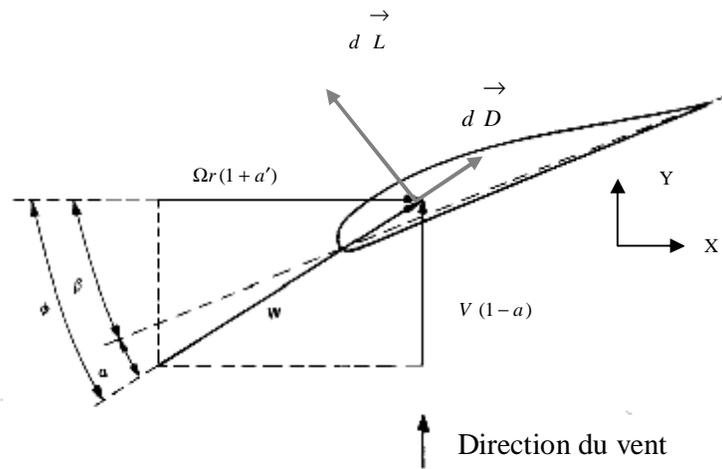


Figure 2.3 Section d'un élément de la pale à un rayon r

Soit :

W : vitesse relative de l'air

$$dq = \frac{1}{2} r W^2 dA = \frac{1}{2} r W^2 c dr \quad (2.29)$$

On a :

$$C_L = \frac{dL}{dq} \quad (2.30)$$

$$C_D = \frac{dD}{dq} \quad (2.31)$$

L : la force de portance

D : la force de traînée

C_L : le coefficient de portance

C_d : le coefficient de traînée

$$C_x = \frac{dF_x}{dq} \quad (2.32)$$

$$C_y = \frac{dF_y}{dq} \quad (2.33)$$

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 3, on peut écrire:

$$C_y = C_L \cos f + C_D \sin f \quad (2.34)$$

$$C_x = C_L \sin f - C_D \cos f \quad (2.35)$$

On a :

$$dF_t = B dF_x$$

$$dT = B dF_y$$

Où :

B : est le nombre de pales

D'après la figure 2.3, on a :

$$a = f - b \quad (2.36)$$

$$\tan f = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\Omega r} \quad (2.37)$$

Où:

a : est l'angle d'attaque (d'incidence.)

b : est l'angle de vrillage.

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

$$dT = BC_y dq = BC_y \frac{1}{2} rW^2 cdr \quad (2.38)$$

$$dQ = BC_x dqr = BC_x \frac{1}{2} rW^2 crdr \quad (2.39)$$

L'égalité de l'équation (2.14) avec (2.38) et celle de l'équation (2.17) avec (2.39) donne :

$$\frac{a}{1-a} = \frac{cBC_y}{8pr \sin^2 f} \quad (2.40)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{cBC_x}{8pr \sin f \cos f} \quad (2.41)$$

Aussi la figure 2.3 permet d'écrire:

$$W = \frac{V}{\sin f} = \frac{V_0(1-a)}{\sin f} \quad (2.42)$$

D'où:

$$W = \frac{\Omega r(1+a')}{\cos f} \quad (2.43)$$

Le coefficient de pleinétude local (local solidity) est défini comme suit [5]:

$$s = \frac{cB}{2pr} \quad (2.44)$$

La résolution des deux équations (2.40) et (2.41), donne les expressions de \underline{a} et de $\underline{a'}$ respectivement :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 f}{sC_y} + 1} \quad (2.45)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin f \cos f}{sC_x} - 1} \quad (2.46)$$

Remarque :

Certains auteurs ([6], [7] et [8]) affirment que le coefficient de traînée doit être omis des équations (2.34) et (2.35), 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 rotationnellement 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 définit par la formule suivante :

$$F = \frac{B\Gamma}{\Gamma_\infty} = \frac{2}{par \cos(e^{-f})} \quad (2.47)$$

Avec :

$$f = \frac{\frac{B}{2}(R-r)}{r \sin f} \quad (2.48)$$

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

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

Les facteurs d'interférence axial et tangentiel deviennent :

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 f}{sC_y} + 1} \quad (2.49)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin f \cos f}{sC_x} - 1} \quad (2.50)$$

Dans la pratique cette correction a très peu d'influence sur la prévision de la performance de l'éolienne et elle est souvent négligée [3].

2.3 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 croit de Ω à $\Omega + w_2$, alors que la vitesse axiale reste inchangée:

$$p + \frac{1}{2} r \Omega^2 r^2 = p' + \frac{1}{2} r (\Omega + w_2)^2 r^2$$

$$p - p' = r \left(\Omega + \frac{1}{2} w_2 \right) w_2 r^2 \quad (2.51)$$

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

$$dT = r \left(\Omega + \frac{1}{2} w_2 \right) w_2 r^2 2p r dr \quad (2.52)$$

Introduisant le facteur d'interférence tangentiel a' dont l'expression est donnée par l'équation (2.24):

$$a' = \frac{w_2}{2\Omega}$$

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

$$dT = 4a'(1+a')r\Omega^2 r^2 p r dr \quad (2.53)$$

La division des deux équations (2.14) et (2.53) donne :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{V_0^2} \quad (2.54)$$

Prenant la vitesse spécifique (Tip speed ratio) comme :

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

et la vitesse spécifique locale comme [5]:

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

L'équation (2.54) devient :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = I_r^2 \quad (2.55)$$

L'expression de la puissance extraite dans l'équation (2.20) peut s'écrire :

$$P = 2\rho r V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (2.56)$$

Ou bien :

$$P = \frac{1}{2} \rho p R^2 V_0^3 \cdot \frac{4I^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (2.57)$$

Le coefficient de puissance C_p est formulé comme suit:

$$C_p = \frac{4I^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (2.58)$$

Le coefficient de puissance dépend du facteur K tel que:

$$K = a'(1-a) \quad (2.59)$$

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

Les deux équations (2.55) et (2.59) permettent d'exprimer K en fonction de a .

Le maximum de K est atteint si, on prend:

$$\frac{\partial K}{\partial a} = 0 \quad (2.60)$$

Cela implique :

$$\frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} = I_r^2 \quad (2.61)$$

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

$$a' = \frac{(1-3a)}{(4a-1)} \quad (2.62)$$

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.

2.3.1 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 (2.62), 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 (2.45) devient:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 f}{s C_L \cos f} + 1} \quad (2.63)$$

Aussi, l'expression de a' de l'équation (2.46) devient:

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos f}{s C_L} - 1} \quad (2.64)$$

Où :

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

Si on substitue l'expression (2.62) dans cette dernière l'équation, on obtient :

$$a = \frac{4 \cos f}{sC_L + 12 \cos f} \quad (2.65)$$

L'égalité des deux expressions de a dans les équations (2.63) et (2.65) donne l'équation quadratique suivante dont l'inconnue est sC_L :

$$(sC_L)^2 + 8 \cos f \cdot sC_L - 16 \sin^2 f = 0 \quad (2.66)$$

Cette équation admet deux solutions :

$$sC_L = -4(\cos f + 1) \quad (2.67)$$

$$sC_L = 4(1 - \cos f) \quad (2.68)$$

La première racine n'est pas acceptable car $sC_L < 0$.

La deuxième racine donnée par (2.68) donne l'expression optimale de la corde le long de la pale :

$$C = \frac{8pr}{BC_L} (1 - \cos f) \quad (2.69)$$

Pour déterminer l'angle optimal f , et par conséquent l'angle optimal de vrillage b , des transformations similaires sont à envisager.

La formule (2.37) peut s'écrire comme suit :

$$\tan f = \frac{(1-a)}{(1+a')} \frac{1}{I_r} \quad (2.70)$$

Si on substitue l'expression (2.62) dans cette dernière l'équation, on obtient :

$$I_r = \frac{(4a-1)(1-a)}{a} \frac{1}{\tan f} \quad (2.71)$$

La substitution de l'équation (2.63) dans (2.71) donne :

$$I_r = \frac{(2 \cos f - 1)(1 + \cos f)}{(1 + 2 \cos f) \sin f} \quad (2.72)$$

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$I_r = \frac{\cos f + \cos 2f}{\sin f + \sin 2f} \quad (2.73)$$

D'où :

$$I_r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2} f} \quad (2.74)$$

On aboutit finalement à :

$$f = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{I_r} \quad (2.75)$$

On déduit l'angle optimal de vrillage b de l'équation (2.36):

$$b = f - a_{opt} \quad (2.76)$$

Où :

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

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

Le tableau 2.1 donne la répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil NACA 63-421.

Tableau 2.1 la distribution optimale de la corde et de l'angle de vrillage (profil NACA 63-421)

r/R	Corde (m)	Angle de vrillage (Deg)
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

Le tableau 2.1 donne la répartition de la corde et de l'angle de vrillage pour une pale ayant un profil LS1-0417.

Tableau 2.2 la distribution optimale de la corde et de l'angle de vrillage (profil LS1-0417)

r/R	Corde (m)	Angle de vrillage (Deg)
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 2.4 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.

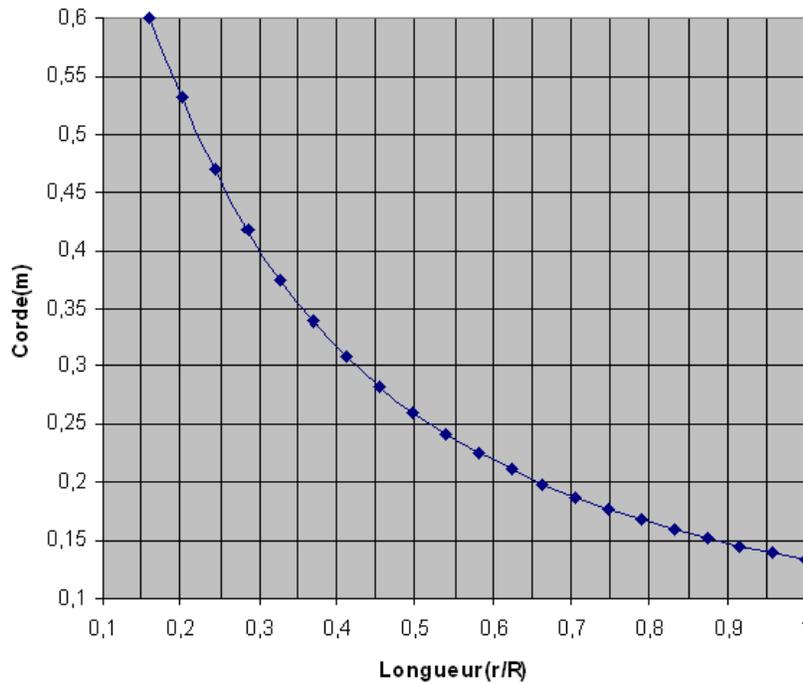


Figure 2.4 Distribution optimale de la corde profil NACA 63-421

La figure 2.5 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.

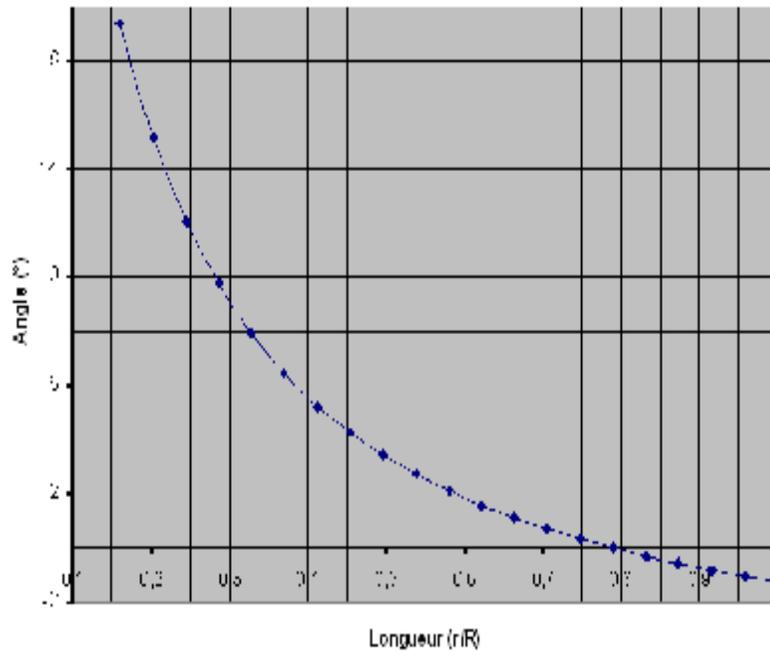


Figure 2.5 Angle optimal de vrillage profil NACA 63-421

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.

2.3.2 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 I .
- Le nombre de pales B .
- Les caractéristiques du profil $C_L(a)$ et $C_D(a)$.

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 $b(r)$.

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 :

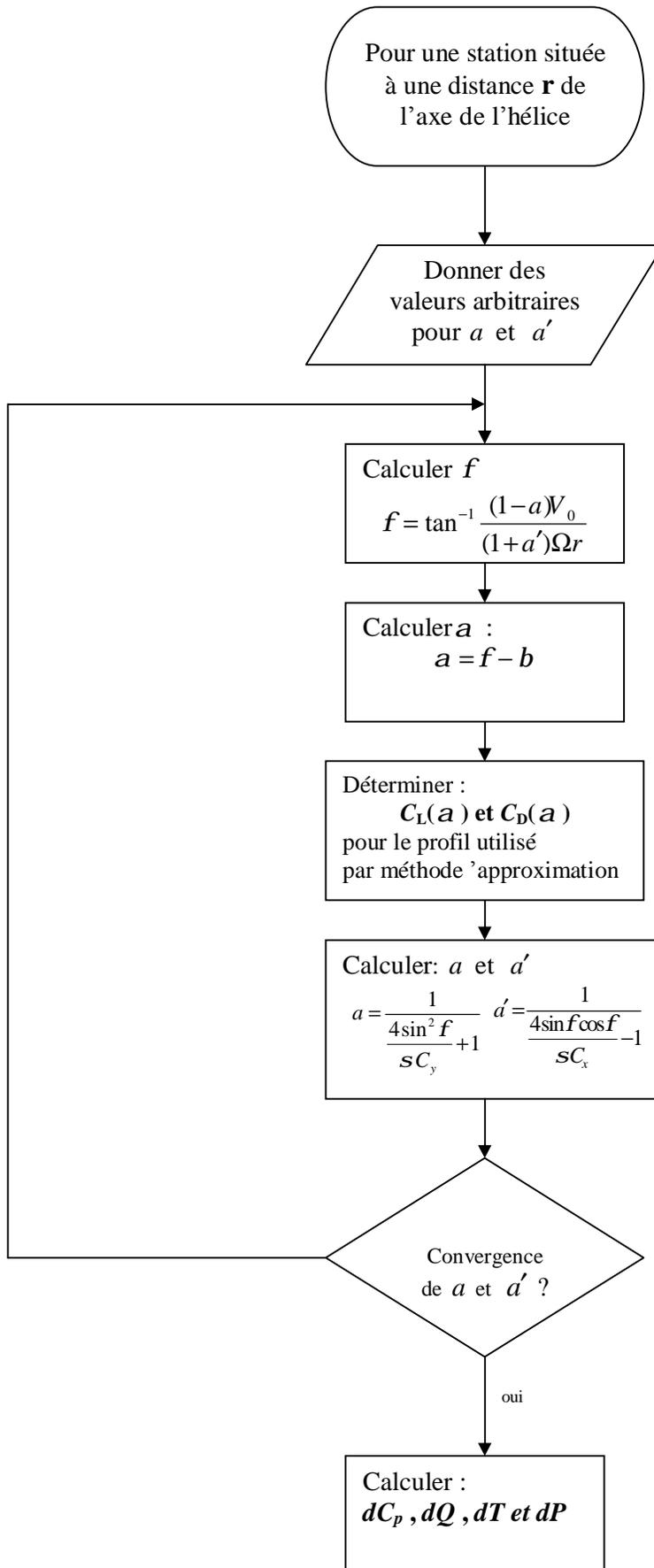
1. On donne la valeur de r qui détermine la distance de l'élément de la pale par rapport au centre de l'hélice (où ce calcul sera effectué).
2. On suppose des valeurs initiales raisonnables pour a et a' ($a = \frac{1}{3}$ et $a' = 0$ à titre d'exemple)
3. On calcule f à l'aide de l'équation (2.37)
4. On calcule a à l'aide de la formule $a = f - b$ de l'équation (2.36)
5. On détermine $C_L(a)$ et $C_D(a)$ pour l'angle calculé a par une méthode d'approximation en utilisant le tableau des caractéristiques du profil utilisé.
6. On calcule a et a' en utilisant les formules (2.49) et (2.50).
7. On Compare les valeurs de a et a' avec celles précédentes et on répète les étapes 3 à 6 jusqu'à l'obtention de la précision voulue.
La convergence de a et 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 (tip losses) sont prises en considération, les formules adéquates doivent être utilisées.

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

L'organigramme de la figure 2.6 résume cet algorithme de résolution.

Figure 2.6 Organigramme de la méthode BEM, pour le calcul statique et énergétique du rotor



Le table 2.3 donne la distribution des charges aérodynamique sur une pale profil NACA 63-421 pour une vitesse du vent de 15 m/s.

Table 2.3 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

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

La figure 2.7, donne la distribution de la force axiale, le long de la pale.

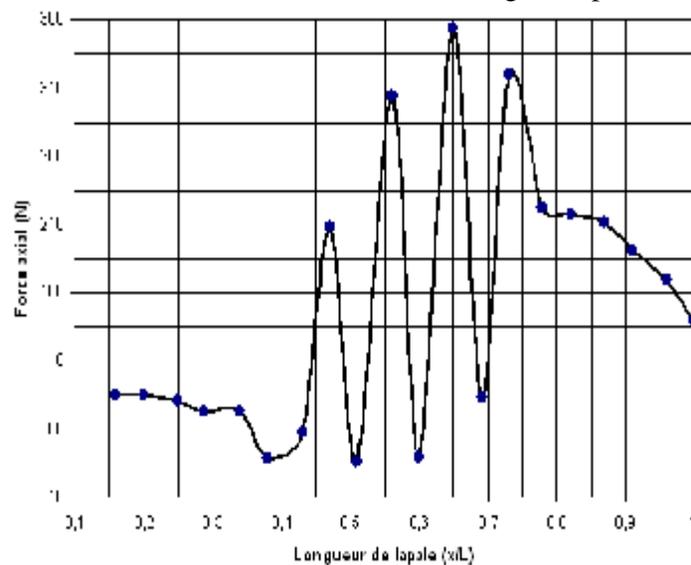


Figure 2.7 Distribution de l'effort axial le long de la pale

Table 2.4 :Puissance extraite par un aérogénérateur tripale de 10 m de diamètre

Profil	Max(C_l/C_d)	Angle (°) d'incidence optimal	Angle de vrillage Max (°)	Puissance extraite (KW)	coefficient de puissance (C_p)
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

2.4 CONCLUSION

La conception optimale de l'hélice, pour un site donné, doit être basée sur la vitesse du vent correspondante à la puissance moyenne maximale du vent pour le site en question. Les courbes de puissance moyenne, concernant plusieurs sites à travers le territoire national, sont présentées dans l'annexe III.

Les efforts aérodynamiques obtenus par la méthode BEM serviront aussi bien pour estimer les performances énergétiques que pour analyser la structure de l'hélice.

Cette méthode itérative, 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 assure la convergence la méthode.

A cause de la variation de l'angle d'incidence à chaque itération, les coefficients de portance et de traînée, qui varient en fonction de cet angle, ont été évalués à l'aide d'une approximation mathématique utilisant les données expérimentales.

REFERENCES

- [1] E. Lysen "Introduction to wind energy" Netherlands: Amersfort, 2nd Edition , 1983.
- [2] 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
- [3] D.Wood "The design and analysis of small wind turbines" University of Newcastle
School of Engineering NSW 2308 Australia, 1st edition of Notes 2002
- [4] 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
- [5] 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
- [6] S. M. Habali , I. A.Saleh "Design and testing of small mixed airfoil wind turbine blades"
Renewable Energy, Vol. 6, No. 2, pp. 161 -169, 1995 Elsevier Science Ltd
- [7] O.Vries "Fluid dynamic aspects of wind energy conversion" Agard publication AG 243,
1979
- [8] W.M.A. Jansen " Horizontal axis fast running wind turbines for developing countries"
Publication SWD 76-3, Amersfoort, June 1976.
- [9] R.T.Griffiths, M.G.Woollard "performance of optimal wind turbine"
Applied energy, 4, PP. 261-272, 1978.
- [10] F.Bertagnolio, N.Sorensen « Wind Turbine Airfoil Catalogue »
Riso (National Laboratory, Roskilde), Denmark August 2001.

Troisième partie

Calcul de la structure de l'hélice

CHAPITRE 3

Analyse modale Calcul des fréquences et modes propres

CHAPITRE 3

Analyse modale Calcul des fréquences et modes propres

3.1 Introduction

Les pales d'une éolienne sont la partie la plus flexible de cette machine, et leur comportement modal a une grande influence sur sa dynamique totale et ses performances énergétiques [1].

Récemment, plus d'attention a été accordée à l'analyse modale, cela est reflété par le nombre d'études expérimentales et numériques réalisées sur ce sujet [2].

L'analyse modale des pales implique le calcul de leurs fréquences et modes propres. Ce calcul est nécessaire pour déterminer les contraintes dynamiques qui agissent sur ces éléments et peut nous aider à mieux prévoir les problèmes de structure [3].

Cette étape est essentielle sachant que les pales sont soumises à des efforts cycliques très variables susceptibles d'atteindre des proportions extrêmes et favorisant ainsi la fatigue.

La fatigue des pales est un problème fréquent qui entrave le bon fonctionnement des éoliennes [4].

Le calcul des fréquences et des modes propres d'une pale en rotation est un problème épineux à cause de la complexité de l'équation qui régit son mouvement. En effet cette équation n'a pas de solution exacte; en plus, elle est caractérisée par des conditions aux limites complexes qui entravent toute solution numérique [5].

Dans ce travail deux méthodes sont utilisées : la première est basée sur la résolution numérique de l'équation du mouvement, utilisée pour une pale de forme relativement simple.

La deuxième méthode est une modélisation par éléments finis (utilisant le logiciel Ansys[®]), appliquée à une pale de forme complexe

Dans le deuxième cas, la pale utilisée a une forme vrillée et une corde variable. Son profil a une forme variable: ayant initialement une forme cylindrique à l'encastrement, puis change progressivement en s'éloignant du centre de l'hélice pour prendre une forme elliptique, avant d'épouser la forme finale du profil aérodynamique choisi.

L'utilisation du logiciel Ansys[®] a permis aussi la confrontation de ses résultats avec ceux obtenus par résolution de l'équation différentielle.

3.2 Calcul des fréquences et modes propres pour une pale rotative de forme géométrique simple:

Dans cette partie, les fréquences des modes de flexion sont calculées par une méthode de discrétisation. Les modes propres sont obtenus par résolution numérique de l'équation du mouvement. Cette équation différentielle des modes est caractérisée par des conditions aux limites complexes.

La pale utilisée, dans ce cas, est de forme géométrique simple et ayant les caractéristiques suivantes:

Profil: NACA63-421

Longueur : 5m

Longueur moyenne de la corde: 0,4 m

Matériaux : Alliage d'aluminium

3.2.1 Calcul des fréquences propres:

Dans cette méthode la pale est divisée en un nombre fini d'éléments, cette approche est basée sur l'équation d'équilibre de chaque élément; l'ensemble des équations de tous les éléments donnent une suite d'équations qu'on peut transformer en une équation matricielle dont la solution permettra de déterminer les fréquences propres de la pale [6].

Soit un élément de la pale de longueur l et qui a une masse uniformément distribuée.

En tenant compte des forces d'inertie, les équations d'équilibre de l'élément sont exprimées comme suit (voir figure 3.1) :

$$G_{n+1} = G_n + \int_{x_{n+1}}^{x_p} \Omega^2 \cdot x \cdot m \cdot dx = G_n + 0,5 \cdot \Omega^2 \cdot m \cdot (x_n^2 - x_{n+1}^2) \quad (3.1)$$

$$V_{n+1} = V_n - \int_{x_{n+1}}^{x_p} \omega^2 \cdot Z \cdot m \cdot dx = V_n - \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot l \cdot (Z_n + Z_{n+1}) \quad (3.2)$$

$$M_{n+1} = M_n - G_n \cdot (Z_n - Z_{n+1}) - V_n \cdot l + \int_{x_{n+1}}^{x_p} (x - x_{n+1}) \cdot \omega^2 \cdot Z \cdot m \cdot dx - \int_{x_{n+1}}^{x_p} (Z - Z_{n+1}) \cdot \Omega^2 \cdot x \cdot m \cdot dx \quad (3.3)$$

V_n est l'effort tranchant au point n

M_n est le moment fléchissant au point n

G_n est la force centrifuge (la tension de la pale) au point n

Z_n est la déflexion du point n

x_n est l'abscisse du point n

m est la masse linéaire de l'élément de la pale

ω est la fréquence propre

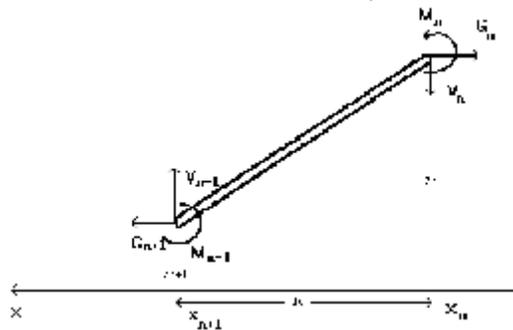


Figure 3.1 élément de la pale

Après l'assemblage de tous les éléments de la pale les suites G , V , M peuvent être transformées en équation matricielle:

$$(\mathbf{A} - \mathbf{I}/\omega^2)\mathbf{Z} = 0$$

Où:

\mathbf{A} est une matrice carrée.

\mathbf{I} est la matrice identité.

Les vecteurs propres \mathbf{Z}_i de matrice \mathbf{A} sont les modes propres, alors que les valeurs propres sont proportionnelles aux fréquences.

Résultat :

Première fréquence = 9,40 Hz

Deuxième fréquence = 15,81 Hz

Troisième fréquence = 57,36 Hz

Le premier et le second mode propre (vecteurs propres) sont représentés par les figures : 3.2 et 3.3

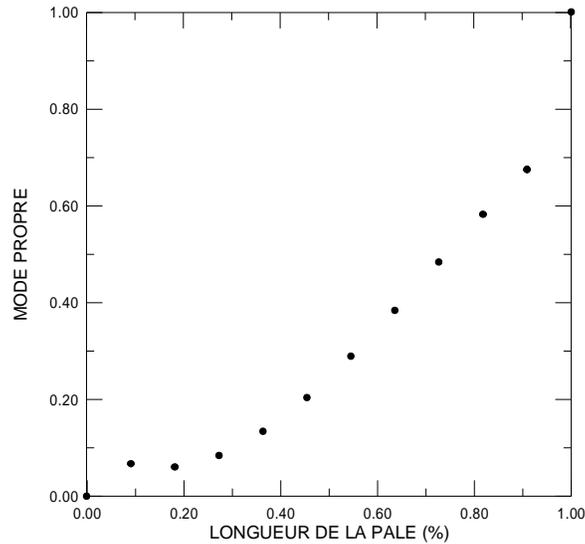


Figure 3.2 Premier mode propre

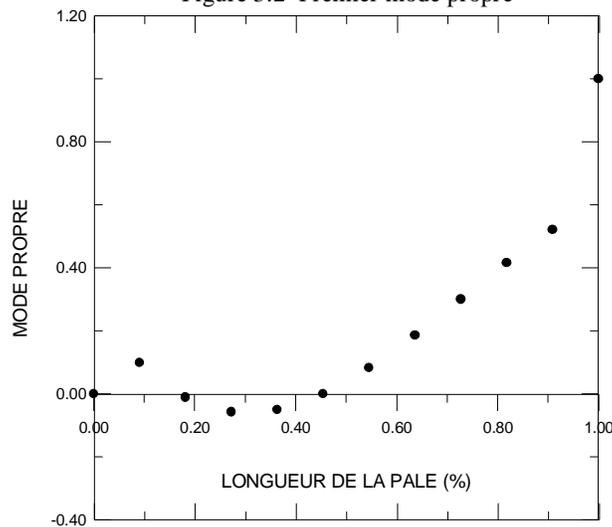


Figure 3.3 Deuxième mode propre

Ces modes sont recalculés dans la section suivante, en utilisant une autre approche, dans le but d'améliorer la précision de ces courbes.

3.2.2 Résolution de l'équation des modes propres de flexion :

La méthode précédente a permis de déterminer les fréquences naturelles avec une bonne précision; mais pour le calcul des modes propres, d'une manière précise, cette méthode est limitée (seul le premier mode obtenu a une forme acceptable). Pour cela, une autre approche basée sur la résolution numérique de l'équation différentielle des modes propres, est utilisée.

Cette dernière méthode de calcul des modes propres est avantageuse, car elle permet de déterminer un grand nombre de points pour chaque mode. Cela assure une parfaite continuité et précision pour les courbes de ces modes. Le nombre de point à déterminer, dans ce cas, n'est pas limité par la capacité du calculateur utilisé, contrairement à la méthode matricielle précédente.

Dans cette section la méthode de résolution de l'équation des modes propres de flexion est présentée.

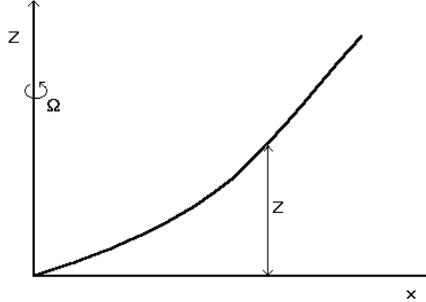


Figure 3.4 Déflexion de la pale

Le mouvement de flexion est régi par l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E.I \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(G \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + m \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (3.4)$$

Où:

$$G = \int_x^L m \cdot \Omega^2 \cdot x \cdot dx$$

t : le temps.

F : l'effort aérodynamique.

G : la force centrifuge.

E : le module d'élasticité.

I: le moment d'inertie de la section.

Pour le mouvement libre on a:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E.I \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(G \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + m \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = 0 \quad (3.5)$$

En prenant $Z = S(x) \cdot j(t)$ la méthode de séparation de variable nous permet d'obtenir les deux équations différentielles ordinaires :

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(E.I \frac{d^2 S}{dx^2} \right) - \frac{d}{dx} \left(G \frac{dS}{dx} \right) - m w^2 S = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{d^2 j}{dt^2} + w^2 j = 0 \quad (3.7)$$

Les valeurs de w sont tirées de la méthode précédente.

Les conditions aux limites de l'équation (3.6) sont :

□ **au bout fixe (encasté) de la pale:**

$$\text{Déplacement} = 0 \quad \Rightarrow \quad S(0) = 0 \quad (3.8)$$

$$\text{Pente} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dS(0)}{dx} = 0 \quad (3.9)$$

□ **au bout libre de la poutre:**

$$\text{Moment fléchissant} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2S(L)}{dx^2} = 0 \quad (3.10)$$

$$\text{Effort tranchant} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dS^3(L)}{dx^3} = 0 \quad (3.11)$$

La difficulté de résolution de l'équation (3.6) est liée à ces conditions aux limites complexes, ayant deux valeurs initiales et deux valeurs finales (équation 3.8 à 3.11).

Pour pouvoir résoudre l'équation (3.6) numériquement, les valeurs initiales $\frac{d^2S(0)}{dx^2} = 0$ et

$\frac{d^3S(0)}{dx^3} = 0$ doivent être connues. Au départ, on donne deux valeurs arbitraires pour ces valeurs initiales dans le but de démarrer l'approche numérique et d'obtenir la fonction $S(x)$.

Il est évident que la solution obtenue ne satisfait pas les conditions aux limites de notre problème, car différentes valeurs initiales donneront différentes solutions.

Il a été vérifié que la méthode de prédicteur-correcteur (formule d'Adams) peut résoudre cette équation avec une bonne convergence, contrairement à celle de Runge Kutta dont l'utilisation ne permet pas d'atteindre la convergence [6].

Pour déterminer les valeurs initiales, l'approche suivante est utilisée :

Soit :

$$x_1 = \frac{d^2S(0)}{dx^2} \quad \text{et} \quad x_2 = \frac{d^3S(0)}{dx^3} \quad (3.12)$$

$$f(x_1, x_2) = \frac{d^2S(L)}{dx^2} \quad (3.13)$$

$$g(x_1, x_2) = \frac{d^3S(L)}{dx^3}$$

Le problème des conditions aux limites est formulé comme un système de deux équations :

$$f(x_1, x_2) = 0 \quad (3.14)$$

$$g(x_1, x_2) = 0 \quad (3.15)$$

La méthode de la sécante est utilisée pour résoudre les équations (3.14) et (3.15).

On commence par deux valeurs arbitraires x_1 et x_2 , les valeurs f et g sont calculées numériquement par le prédicteur-correcteur (les expressions de f et g ne sont pas connues analytiquement). Une nouvelle valeur de x_1 est estimée par l'équation (3.14) et une autre valeur pour x_2 à l'aide de l'équation (3.15). Cette approche itérative est répétée jusqu'à convergence.

Cette méthode de calcul des modes propres permet de déterminer les courbes des modes propres avec une parfaite continuité (car le nombre de points calculés n'est pas limité), contrairement aux méthodes matricielles.

Un programme Fortran traduisant l'algorithme de résolution a été élaboré.

Résultat :

Les modes obtenus par la résolution de l'équation différentielle sont représentés par les figures 3.5, 3.6 et 3.7

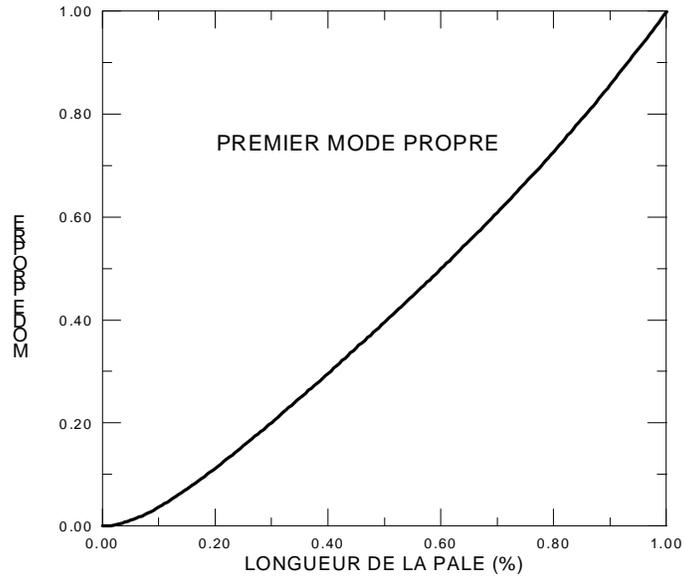


Figure 3.5 Premier mode propre de flexion

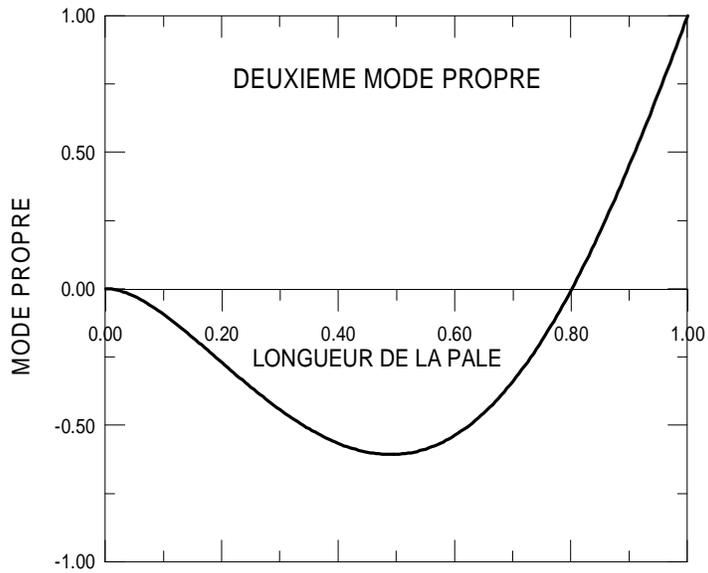


Figure 3.6 Deuxième mode propre de flexion

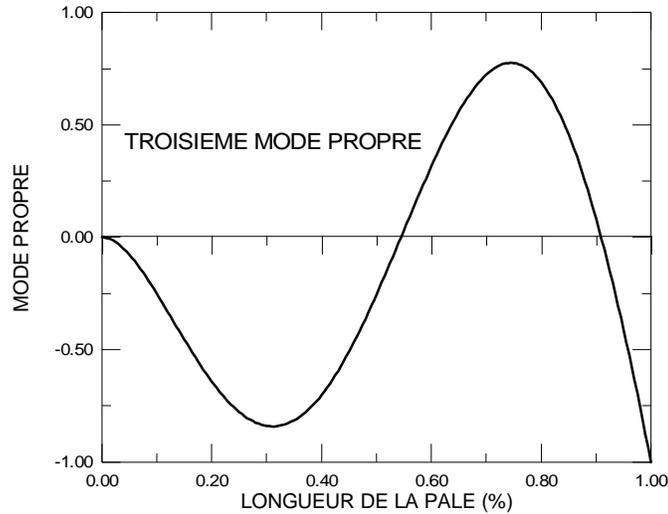


Figure 3.7 Troisième mode propre de flexion

Ces fonctions de forme ont été comparées avec la référence [7] (figure 3.8), les formes de ces fonctions sont similaires. On note la différence des conditions aux limites des deux cas (bout articulé dans l'exemple ci-dessous).

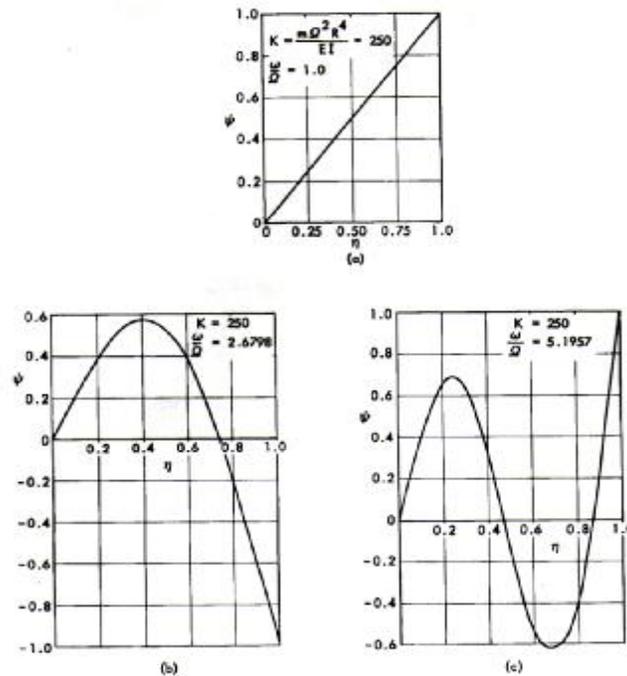


Figure 3.8 Mode propre de flexion référence [7]

3.2.3 Résolution de l'équation des modes propres de torsion:

Dans cette partie, une méthode similaire à celle présentée dans la section précédente est utilisée pour calculer les modes propres de torsion.

Ainsi le mouvement de torsion est régi par l'équation suivante [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(G.J \frac{\partial q}{\partial x} \right) - C. \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} - C. \Omega^2. q = - \frac{\partial L_A}{\partial x} \quad (3.16)$$

Où:

C est le moment d'inertie par unité de longueur.

Ω est la vitesse angulaire.

θ est l'angle de torsion.

L_A est le moment aérodynamique.

$G.J$ rigidité de torsion.

L'équation (5) peut être résolue de la même manière que l'équation (3.6) (l'équation de la flexion), sauf que ces conditions aux limites sont moins complexes.

Pour le mouvement libre on a:

$$\frac{\partial}{\partial x} (GJ \frac{\partial q}{\partial x}) - C \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} - C \Omega^2 q = 0 \quad (3.17)$$

En prenant $q = Q(x).f(t)$ la méthode de séparation de variable nous permet d'obtenir les deux équations différentielles ordinaires :

$$\frac{d}{d.x} (G.J \frac{d.Q}{d.x}) + C (\omega_t - \Omega^2) Q = 0 \quad (3.18)$$

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \omega_t^2 f = 0 \quad (3.19)$$

Ces deux équations (3.18) et (3.19) permettent de calculer les fréquences et les modes propres de torsion.

Conditions aux limites :

(I) $q(0) = 0$ (angle de torsion aux bout fixe = 0)

(II) $\frac{d.q}{d.x}(L) = 0$ (moment de torsion aux bout libre= 0)

Résultat :

Les modes de torsion obtenus par la résolution de l'équation différentielle sont représentés par les figures 3.9, 3.10 et 3.11

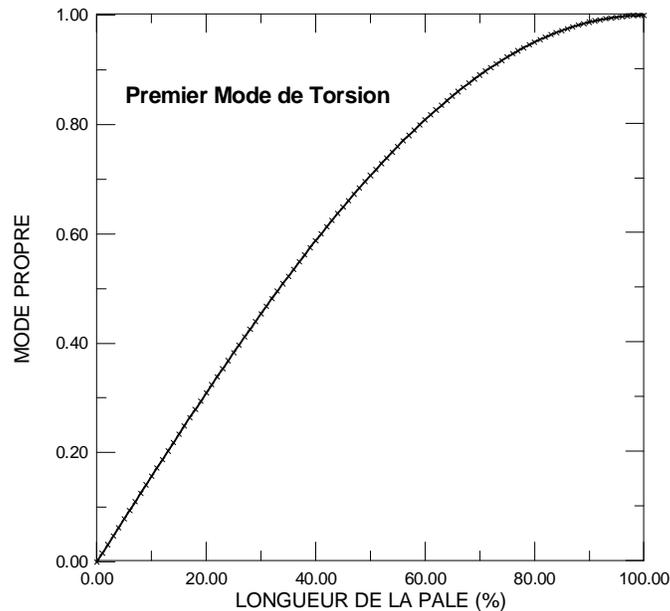


Figure 3.9 Premier mode propre de torsion

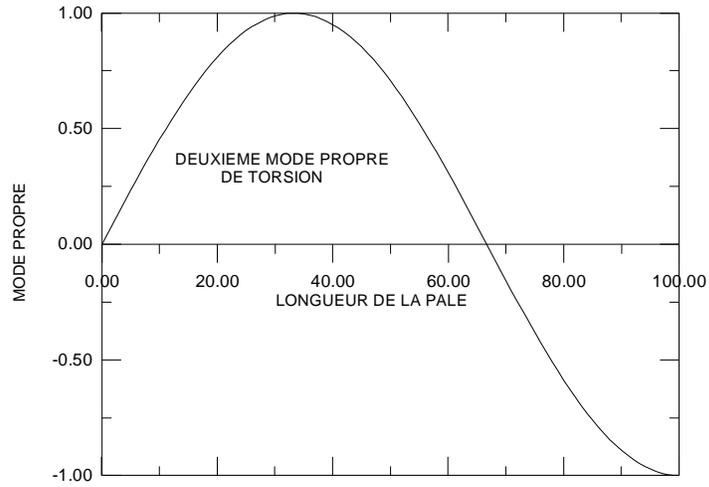


Figure 3.10 Deuxième mode propre de torsion

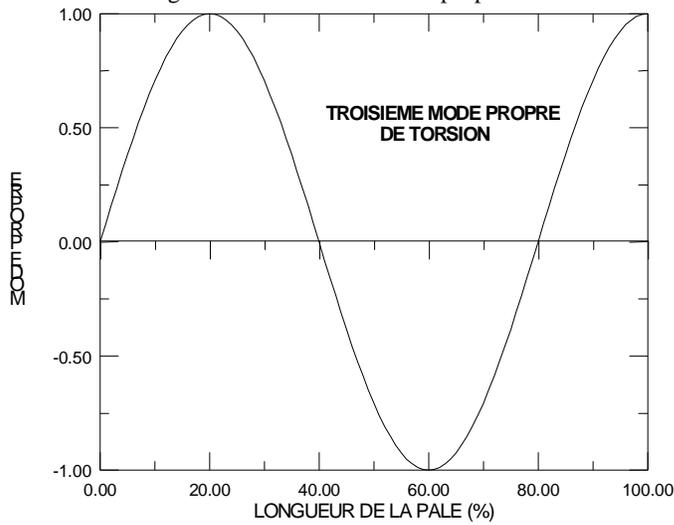


Figure 3.11 Troisième mode propre de torsion

Ces fonctions de forme ont été comparées avec la référence [5] (figure 3.12), les formes de ces fonctions sont similaires. On note la différence des conditions aux limites des deux cas.

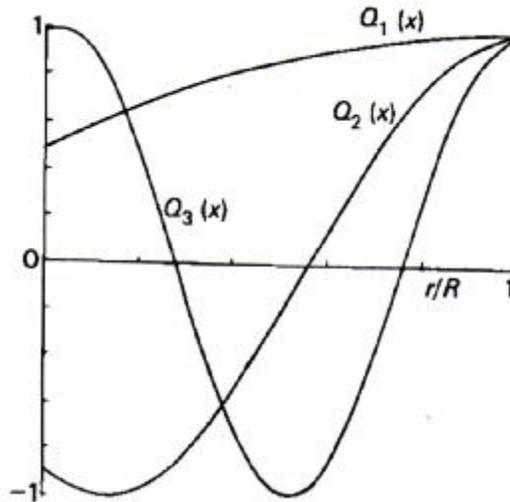


Figure 3.12 mode propre de torsion référence [5]

3.3 Calcul des fréquences et des modes propres pour une pale de forme géométrique complexe par la méthode des éléments finis

Dans cette partie, une modélisation par éléments finis d'une pale de forme complexe a été élaborée en utilisant le logiciel Ansys®.

Cette pale a une forme vrillée, avec une corde variable et utilise différents profils dans les différentes sections (une forme cylindrique à l'encastrement qui change progressivement en s'éloignant du centre de l'hélice pour prendre une forme elliptique avant d'épouser la forme finale du profil aérodynamique choisi).

Cette pale a les caractéristiques suivantes:

Profil: Naca63-421

Longueur : 5m

Longueur maximale de la corde: 0.6 m

Longueur moyenne de la corde: 0.4

Angle maximal de vrillage: 14°

Matériaux: alliage Aluminium

Après la modélisation géométrique et le maillage de cette pale, la figure suivante est obtenue (figure 3.13):

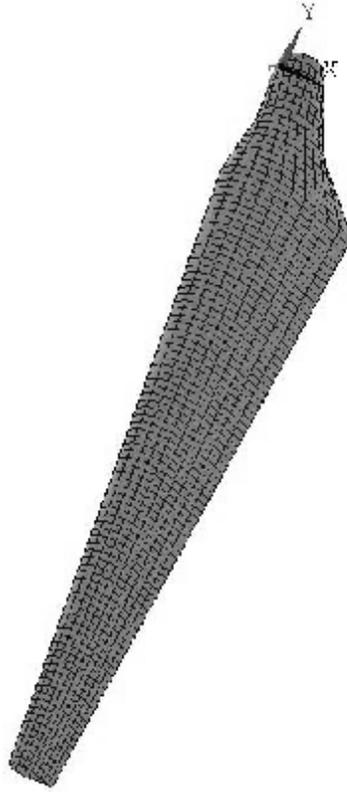


Figure 3.13
Modélisation géométrique de la pale par ANSYS

Un programme Ansys (Log file) a été implémenté, dans le but d'effectuer une analyse modale de la pale (voir annexe IV).

Les résultats de cette analyse sont présentés dans ce qui suit:

Table 3.1 Comparaison des fréquences obtenues par les deux méthodes

Mode	Fréquence ω (Hz) (première méthode)	Fréquence ω (Hz) (utilisation du logiciel ANSYS®)
Premier mode propre	9,40	8,37
Deuxième mode propre	15,81	14,94
Troisième mode propre	57,36	62,74

Les modes propres obtenus en utilisant le logiciel ANSYS sont donnés par les figures 3.14 à 3.16

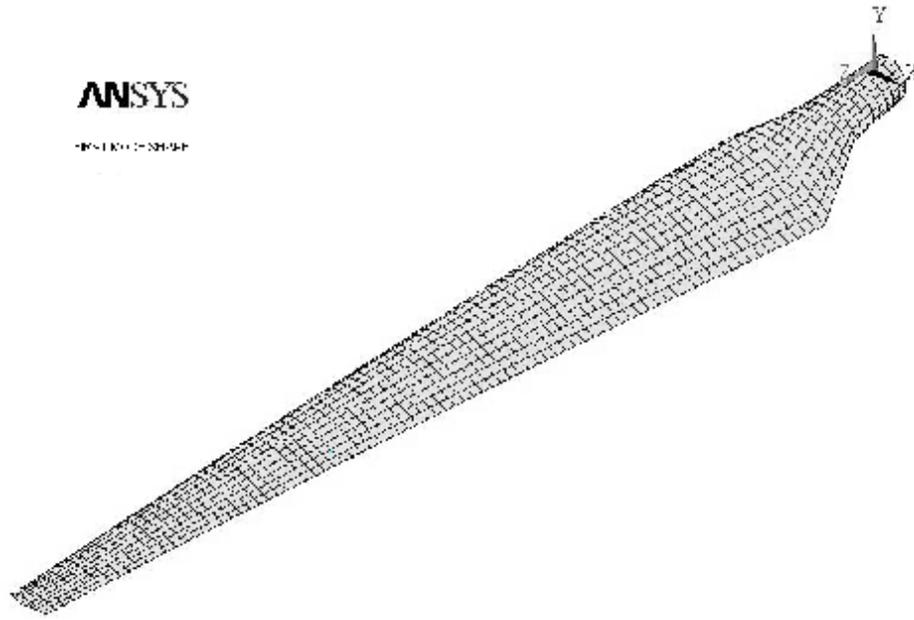


Figure 3.14 Premier mode propre

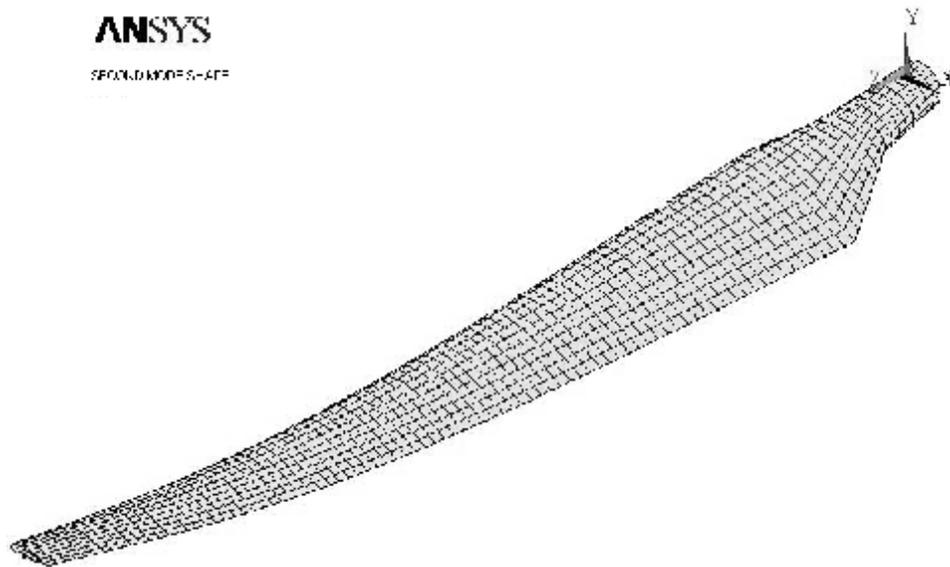


Figure 3.15 Deuxième mode propre

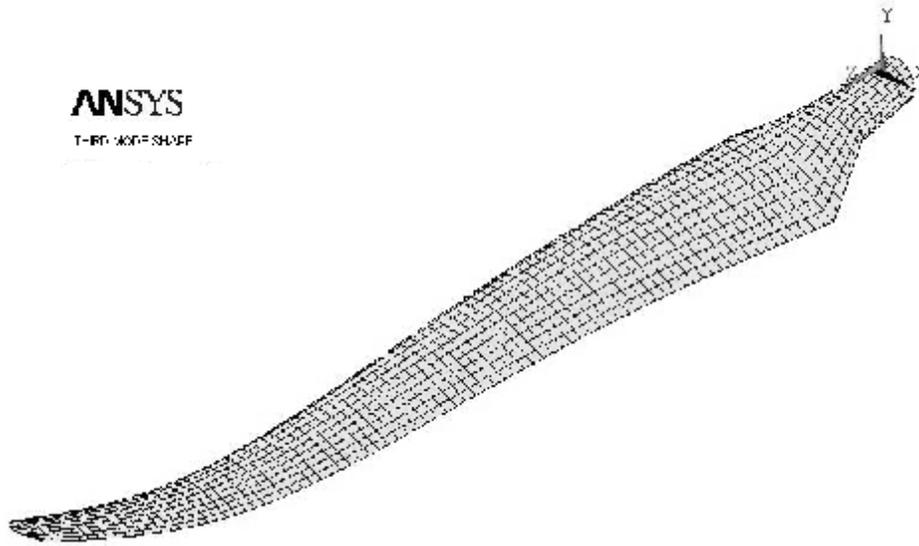


Figure 3.16 Troisième mode propre

Les modes de flexion sont représentés par les courbes suivantes (figure 3.17 à 3.19)

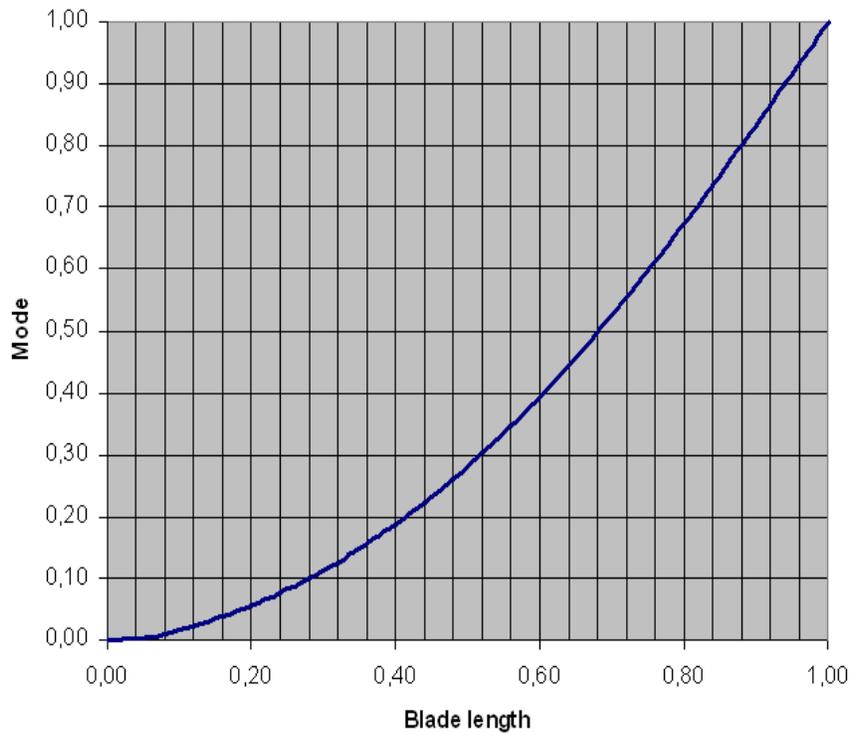


Figure 3.17
Premier mode propre de flexion par ANSYS

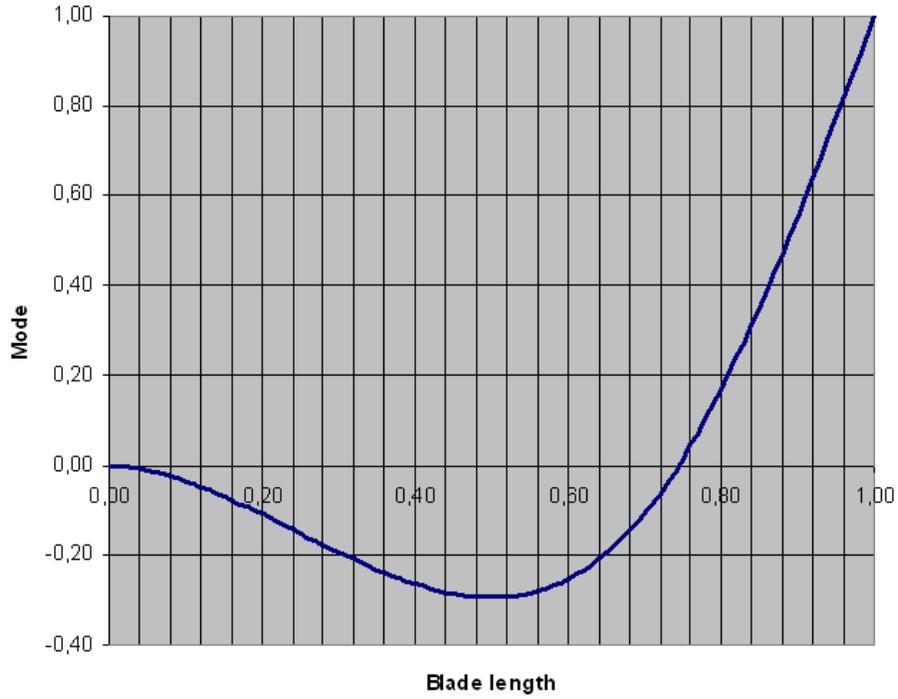


Figure 3.18
Deuxième mode propre de flexion par ANSYS

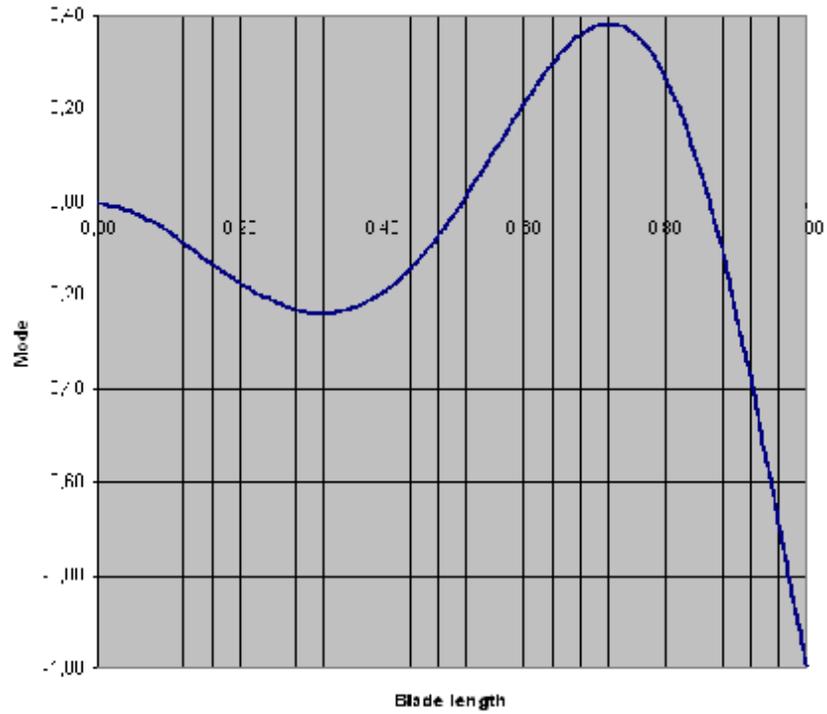


Figure 3.19
Troisième mode propre de flexion ANSYS

3.4 CONCLUSION:

La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes, utilisées dans le calcul modal, ont permis de conclure que les fréquences obtenues par ces deux approches sont du même ordre de grandeur, les modes propres correspondants ont des formes similaires.

Ces fonctions de forme sont aussi très proches de ceux obtenus par Bispling [7] et Baumgart [8].

On peut conclure que la première approche (la résolution de l'équation différentielle du mouvement) est un outil pratique est moins coûteux pour estimer les modes propres, malgré sa limitation comparée à des logiciels sophistiqués comme ANSYS.

Les résultats de cette modélisation peuvent être utilisés pour calculer les contraintes dynamiques, afin d'estimer la fatigue des pales, par la suite.

Références:

- [1] P.S. Veers, T.D. Ashwill, "Trends in Design Manufacture and Evaluation of Wind turbine". Wind Energy, 2003, vol. 6, PP.245-259.
- [2] F. Rasmussen, M.H. Hansen, Present status of aeroelasticity of wind turbine. Wind Energy, vol.6, pp. 213-228, 2003.
- [3] R. Younsi, "Dynamic study of wind turbine blade with horizontal axis". Eur.J.Mech A/solids, vol. 20, pp. 241-252, 2001.
- [4] K.O. Ronoldk, "Reliability-based fatigue design of wind turbine rotor blades". Engineering Structures, vol.21, pp.1101-1114, 1999.
- [5] A.R.S.Bramwell "Helicopter dynamics", Edt Edward Arnold, 1979.
- [6] Z.L.Mahri "Résolution de l'équation des modes propres d'une pale d'éolienne" Conférence Internationale sur les mathématiques appliquées et les sciences de l'ingénieur. Casablaca, Maroc, Nov 1998.
- [7] Bispling Ashley "Aeroelsticity", Edit Addison Wesley, 1975.
- [8] A.Baumgart, "A mathematical model for wind turbine blade". Journal of sound and energy, 2002, Vol. 251, pp. 1-12.

CHAPITRE 4

Analyse dynamique Calcul des contraintes dynamiques et de la fatigue

CHAPITRE 4

Analyse dynamique Calcul des contraintes dynamiques et de la fatigue

4.1 Introduction :

L'analyse du comportement dynamique des pales a un rôle primordial dans la conception des aérogénérateurs, car ces pales sont soumises à des forces de vent très variables favorisant ainsi le cumul de la fatigue, sachant que ce phénomène est l'un des problèmes majeurs qui entrave le bon fonctionnement des éoliennes [1].

Pour estimer la fatigue des pales, le calcul des contraintes dynamiques est nécessaire.

Dans ce chapitre deux approches sont présentées pour le calcul dynamique.

La première est la résolution de l'équation couplée (flexion – torsion) utilisée dans le cas d'une pale de forme géométrique simple, vue comme un système continu. Cette équation est caractérisée par des difficultés particulières de résolution.

La seconde est une modélisation par éléments finis appliquée pour une pale de forme complexe.

4.2 Calcul des contraintes dynamiques pour une pale de forme géométrique simple:

Dans cette approche de résolution, la pale est considérée comme un système continu.

4.2.1 Résolution de l'équation du mouvement de flexion (calcul des déplacements et contraintes normales) :

Le mouvement forcé de flexion (sous l'effet de la force aérodynamique) est régi par l'équation (4.1) déjà introduite dans le chapitre précédent [2]:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(G \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + m \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (4.1)$$

On peut écrire la solution \mathbf{Z} sous la forme:

$$\mathbf{Z} = \sum_{i=1}^n S_i(x) \cdot j_i(t) \quad (4.2)$$

Où

S_i sont les modes propres déjà calculés dans le chapitre précédent.

n est le nombre de modes.

Les modes propres vérifient la propriété d'orthogonalité définie comme suit [2]:

$$\int_0^L m S_i(x) S_j(x) dx = 0 \quad \text{Si } i \neq j \quad (4.3)$$

$$\int_0^L m S_i(x) S_j(x) dx = f(i) \quad \text{Si } i = j$$

Pour résoudre l'équation (4.1) il faut déterminer les fonctions de temps $j_i(t)$.

Si on substitue l'expression de \mathbf{Z} de l'équation (4.2) dans l'équation (4.1), on obtient:

$$\sum_{i=1}^n j_i(t) \left[\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 S_i(x)}{dx^2} \right) - \frac{d}{dx} \left(G \frac{d S_i(x)}{dx} \right) \right] + m \sum_{i=1}^n S_i(x) \cdot \frac{\partial^2 j_i(t)}{\partial t^2} = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (4.4)$$

D'après l'équation (3.6), l'expression entre deux crochets peut être remplacée par $m w^2 S_i(x)$, ainsi l'équation (4.4) devient:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{d^2 j_i(t)}{dt^2} + w^2 j_i(t) \right) S_i(x) = \frac{1}{m} \frac{\partial F}{\partial x} \quad (4.5)$$

Si on multiplie l'équation (4.5) par $m S_i(x)$ et on intègre de 0 à L par rapport à x et en tenant compte de la propriété d'orthogonalité des modes on obtient:

$$\frac{d^2 j_i(t)}{dt^2} + w^2 j_i(t) = \frac{1}{f(i)} \int_0^L \frac{\partial F}{\partial x} S_i(x) dx \quad (4.6)$$

La résolution de l'équation (4.6) permet de déterminer les fonctions $j_i(t)$ et par conséquent les déplacements \mathbf{Z} .

Si la simplification précédente a permis de séparer apparemment les modes, puisque le membre gauche de l'équation (4.6) ne contient qu'un seul mode; le membre droit par contre contient la force aérodynamique $\frac{\partial F}{\partial x}$ qui dépend de la forme de la pale (le déplacement \mathbf{Z}) et

par conséquent de tous les modes (équation(4.6)). Cette interdépendance entre les modes et la forme de la pale complique la résolution de l'équation(4.6).

Pour entamer la résolution de l'équation (4.6), il faut supposer au départ une forme initiale simple de la pale (une déformation rigide par exemple) et ensuite calculer le membre droit de l'équation (4.6) pour chaque mode.

L'équation (4.6) devient:

$$\frac{d^2 j_i(t)}{dt^2} + w^2 j_i(t) = C_i \quad (4.7)$$

Où C_i est cette valeur calculée pour le $i^{\text{ème}}$ mode.

Ces valeurs C_i sont supposées constantes pour un petit intervalle de temps Δt , dans ce cas la solution de (4.7) dans cet intervalle est la suivante [3]:

$$j = \frac{C_i}{w^2} (1 - \cos wt) + j_0 \cos wt + \frac{j'_0}{w} \sin wt \quad (4.8)$$

Où j_0 et j'_0 sont les valeurs initiales.

Les nouveaux modes calculés par (4.8) sont utilisés pour déterminer les déplacements \mathbf{Z} (une nouvelle forme de la pale). Cette procédure est répétée suivant des formules itératives tirées de la solution (4.8):

$$j_{j+1} = \frac{C_i}{w^2} (1 - \cos w\Delta t) + j_j \cos w\Delta t + \frac{j'_j}{w} \sin w\Delta t \quad (4.9)$$

$$j'_{j+1} = \frac{C_i}{w} \sin w\Delta t - w j_j \sin w\Delta t + j'_j \cos w\Delta t \quad (4.10)$$

On note que dans ce cas l'indice j indique le pas de calcul.

Au départ ce calcul est répété jusqu'à la convergence, c à d l'obtention d'une forme de la pale proche de la précédente, cela signifie que la forme initiale est corrigée. Ensuite, on refait le même calcul pour chaque pas de temps.

4.2.2 Résolution de l'équation du mouvement de torsion (calcul des déplacements angulaires et contraintes de cisaillement)

La torsion forcée est régie par l'équation suivante:

$$\frac{\mathcal{I}}{\mathcal{I}_X} (GJ \frac{\mathcal{I}q}{\mathcal{I}_X}) - C \frac{\mathcal{I}^2 q}{\mathcal{I}t^2} - C \Omega^2 q = - \frac{\mathcal{I}L_A}{\mathcal{I}_X} \quad (4.11)$$

La solution de cette équation est de la forme:

$$q = \sum_{i=1}^n Q_i(x) f_i(t) \quad (4.12)$$

$Q(x)$ est le mode propre de torsion.

$f(t)$ est le mode de réponse.

Les modes propres vérifient la propriété d'orthogonalité définie comme suit [2]:

$$\int_0^L Q_i(x) Q_j(x) dx = 0 \quad \text{si } i \neq j \quad (4.13)$$

$$\int_0^L Q_i(x) Q_j(x) dx = f(i) \quad \text{Si } i=j$$

En substituant cette solution (4.12) dans l'équation (4.11) et en tenant compte de l'orthogonalité des modes, on obtient:

$$\frac{d^2 f_i(t)}{dt^2} + w_i^2 f_i(t) = \frac{1}{C f(i)} \int_0^L \frac{\partial L_A}{\partial x} Q_i(x) dx \quad (4.14)$$

La méthode de résolution de l'équation (4.14) est identique à celle de (4.6).

4.2.3 Résolution de l'équation couplée: flexion-torsion (calcul des déplacements et des contraintes) :

Dans les sections précédentes on a étudié les deux mouvements (la flexion et la torsion) d'une manière séparée. Alors qu'en réalité les deux mouvements sont dépendants, car l'une influence l'autre [4].

Dans cette partie, l'effet de la torsion sur la flexion est étudié, autrement dit les modifications apportées sur l'équation de la flexion dues à l'introduction de la torsion. Puisque cette torsion déplace le centre de gravité de la section du profil, engendrant ainsi une variation des moments de flexion et des efforts tranchants.

L'équation proposée par Brooks [2] permet de coupler la flexion et la torsion en introduisant de nouveaux termes dans l'équation de la flexion, ces termes sont évidemment en fonction de l'angle de la torsion. Cette équation a la forme suivante :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(G \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + m \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} + Ft(x, q, \frac{q}{t^2}) = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (4.15)$$

Où :

Ft : est une fonction donnée.

La résolution de cette équation couplée permet de déterminer les contraintes et les déplacements appliqués sur la pale, sous l'influence de ces deux modes.

La difficulté particulière de résolution de cette équation couplée, est due au fait que l'effort aérodynamique dépend de l'angle d'incidence (et par conséquent de la forme de la pale), mais ce même effort aérodynamique influe sur cette forme puisqu'il contribue à la déformation de la pale.

Cette interdépendance entre la forme de la pale et l'effort aérodynamique engendre un effet non linéaire et complique la résolution de l'équation (4.15).

L'équation (4.15) peut être mise sous une forme similaire à (4.1) en transposant le dernier terme du membre gauche.

La résolution est conduite d'une manière similaire à (4.1) avec une approche itérative; on commence par supposer une forme initiale cela permet de déterminer l'effort aérodynamique puis l'angle de torsion q , à l'aide de l'équation (4.11) et ensuite le déplacement Z à l'aide de (4.15). Ce calcul est répété jusqu'à la convergence, c'est à dire la correction de la forme initiale.

Cet algorithme est ensuite répété pour chaque pas de temps afin d'obtenir les contraintes dynamiques ainsi que les déplacements en fonction du temps. Les résultats de cette partie sont présentés ci-dessous.

Résultats:

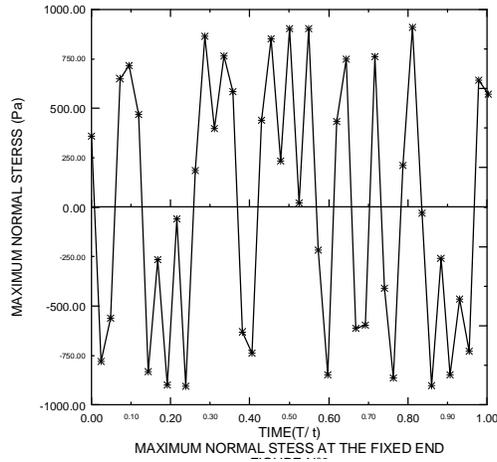


Figure 4.1. Contrainte normale maximale

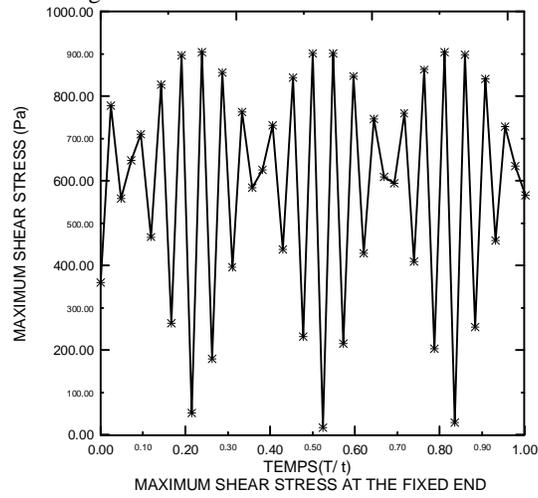


Figure 4.2. Contrainte de cisaillement maximale

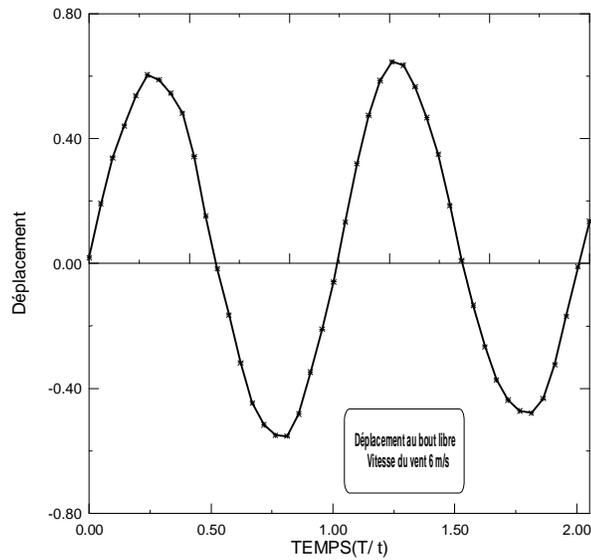


Figure 4.3. Déplacement du bout libre de la pale

4.3 Calcul des contraintes dynamiques pour une pale de forme géométrique complexe (modélisation par éléments finis) :

Dans cette partie une modélisation par éléments finis est réalisée dans le but de calculer les contraintes dynamiques. L'élément utilisé dans le maillage est l'élément coque: Shell 99.

Dans une partie précédente de ce travail, les efforts aérodynamiques ont été calculés et dans la partie analyse modale les fréquences et modes propres ont été estimés. Ces résultats obtenus précédemment peuvent être combinés pour déterminer les forces dynamiques qui seront utilisés pour le calcul des contraintes dynamiques.

Un programme source Ansys (log file program) a été élaboré pour effectuer l'analyse dynamique des pales par éléments finis (voir annexe IV).

Les contraintes équivalentes au bout fixe (à l'encastrement) de la pale sont obtenues pour les différentes vitesses du vent. Ces résultats sont résumés par les courbes suivantes (figures 4.4 à 4.7):

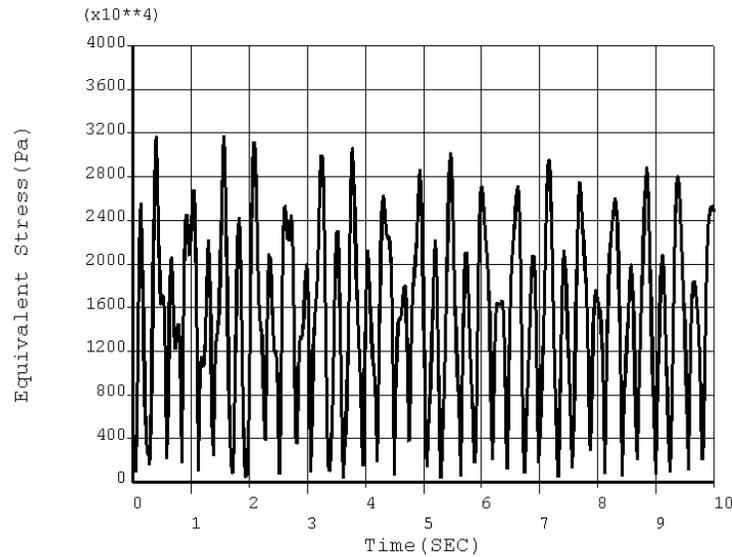


Figure 4.4. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement (Matériau composite Profil NACA63-421 vitesse du vent 7 m/s)

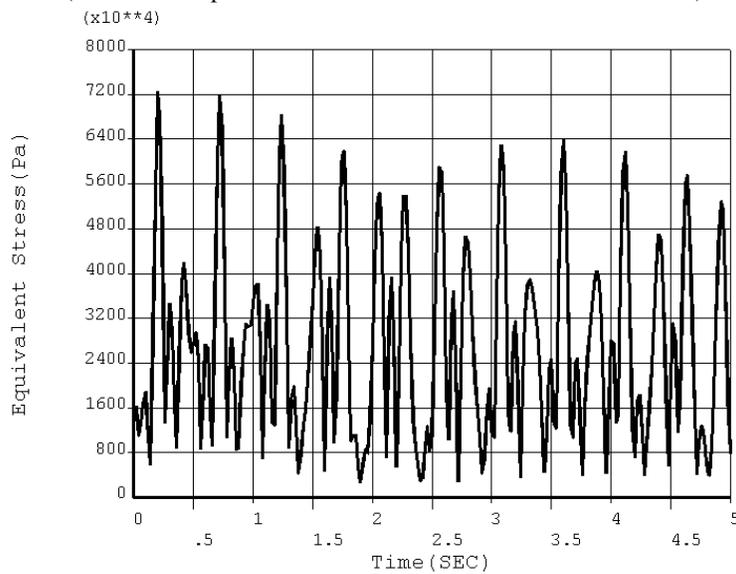


Figure 4.5. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement (Matériau composite Profil NACA63-421 vitesse du vent 15 m/s)

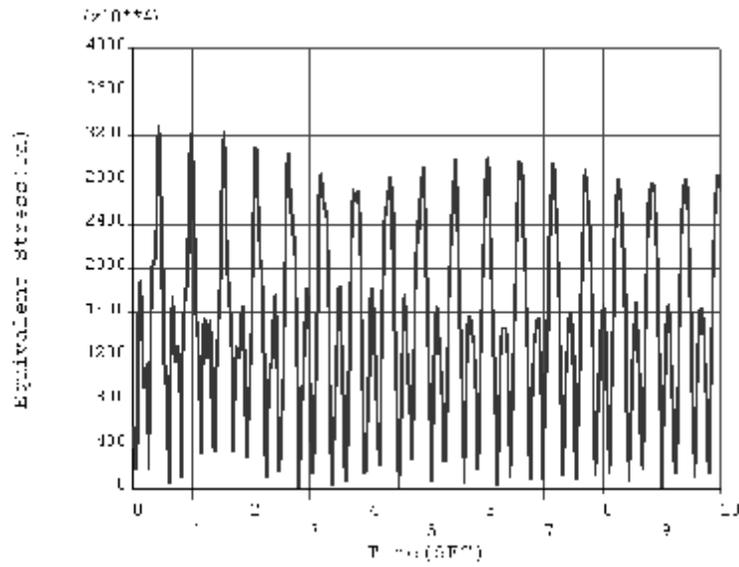


Figure 4.6. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(Matériau Aluminium Profil NACA63-421 vitesse du vent 7 m/s)

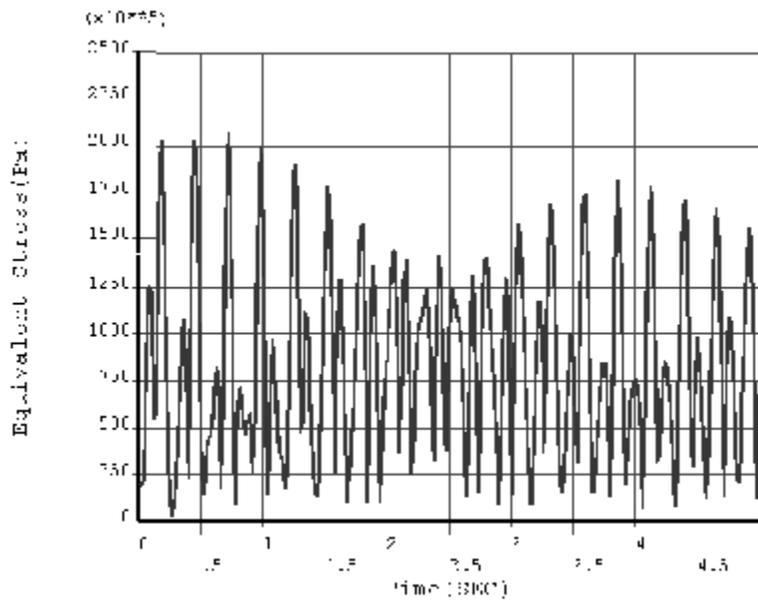


Figure 4.7. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(Matériau Aluminium Profil NACA63-421 vitesse du vent 15 m/s)

Remarque:

Les résultats de ce calcul sont donnés en détail dans l'annexe II.

4.4 Calcul de la fatigue:

La fatigue est estimée à l'aide de la théorie de M.A.Miner connue sous l'appellation « Règle du dommage linéaire cumulé », qui s'applique pour des éléments de machine soumis pendant la durée de leur fonctionnement à des contraintes cyclique dont l'amplitude est variable.

Cette théorie repose sur la supposition que chaque cycle de fonctionnement consomme une fraction de la durée de vie de l'élément. La fatigue (la consommation de la totalité de la durée de vie) peut être estimée en additionnant les fractions de durée de vie consommées à chaque niveau de contrainte.

Miner a formulé sa théorie mathématiquement comme suit :

Si une contrainte d'amplitude σ_1 est appliquée à un élément pour un nombre total de cycle n_1 et dont le nombre de cycle admissible (durée de vie) est N_1 . Aussi si une autre contrainte d'amplitude σ_2 de durée de vie N_2 est appliquée à l'élément pour un nombre de cycle n_2 et ainsi de suite...

La limite de durée de vie serait atteinte si [5]:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1 \quad (4.16)$$

Les valeurs de n_i sont calculées pour une certaine durée de vie et pour chaque vitesse du vent; en se basant sur la distribution statistique des vitesses du vent (voir figure 4.8). Les valeurs de N_i sont estimés de la courbe de la limite d'endurance (voir figure 4.10 et 4.11) en fonction de la contrainte appliquée.

Dans un article plus récent [5], Miner a cité des nombreux essais montrant que, si la charge est aléatoire, l'équation (4.15) donnera des prédictions conservatrices (c à d $\sum_i \frac{n_i}{N_i} > 1$).

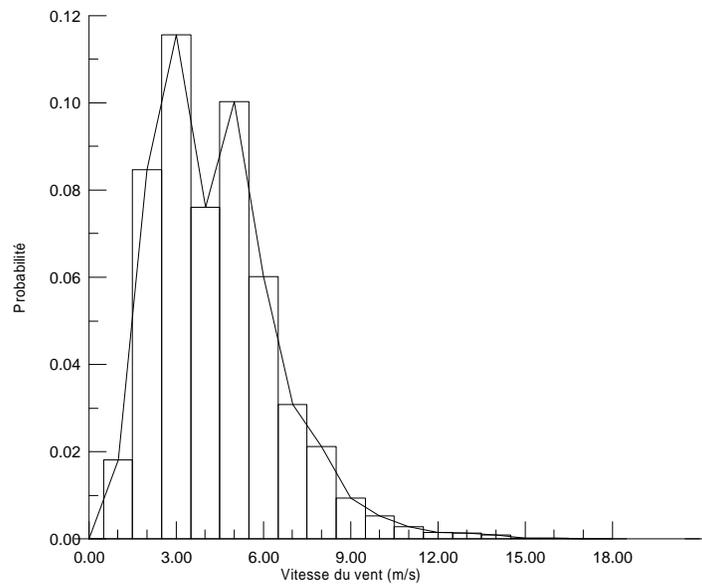


Figure 4.8
Densité de probabilité des vitesses du vent (ville de Constantine)

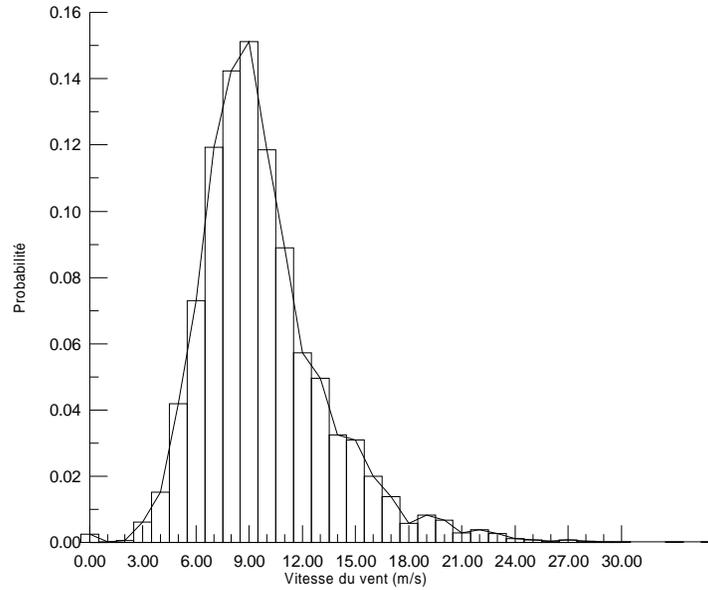


Figure 4.9

Densité de probabilité des vitesses maximales journalières du vent (ville de Constantine)

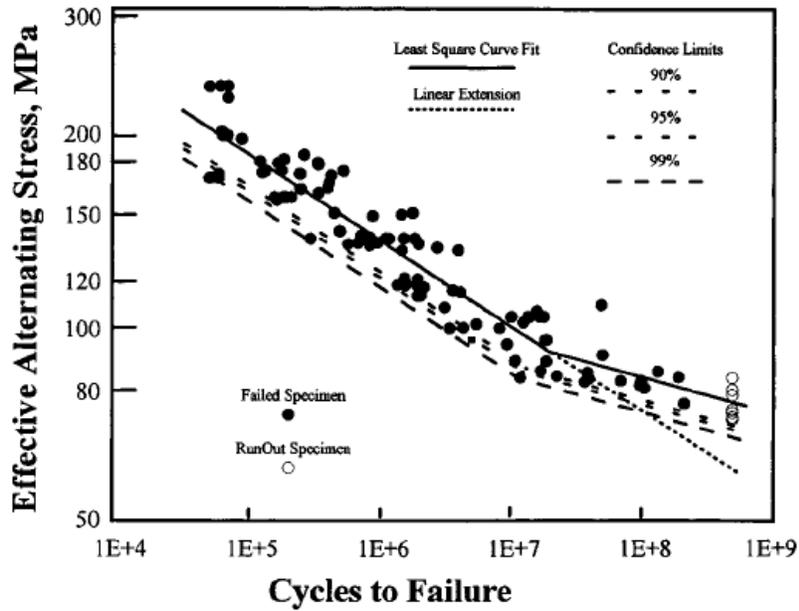


Figure 4.10. Diagramme de la limite d'endurance de l'alliage d'aluminium source [7]

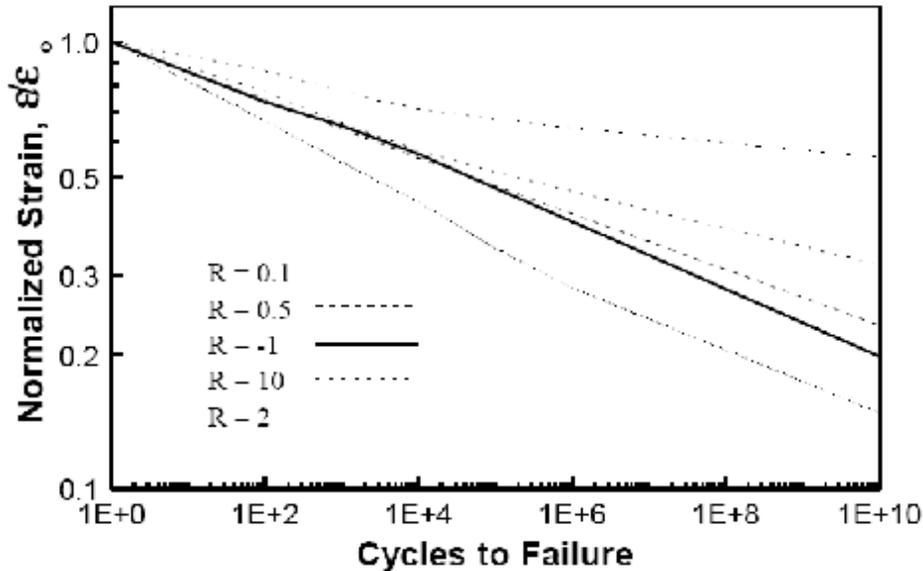


Figure 4.11. Diagramme de Fatigue S-N (Log-Log): Matériaux composite (fibre de verre) [8]

4.4.1 Calcul de la fatigue des pales en alliage d'aluminium :

Dans ce cas on prend une durée de fonctionnement de 10 ans.

La probabilité pour que la vitesse du vent soit comprise dans un intervalle donné est estimée en utilisant la courbe de la figure 4.8; cette donnée permet de calculer le nombre de cycles n_i effectuées, sous cette vitesse, pendant une durée de 10 ans. L'amplitude de la contrainte est estimée de la courbe des contraintes dynamiques, correspondante à cette vitesse. Finalement le nombre de cycles admissible N_i (durée de vie) est déterminé par la courbe de la résistance à la fatigue (figure 4.10).

A titre d'exemple la probabilité pour que la vitesse du vent soit au voisinage de 7 m/s ($6 \leq V \leq 8$) est 0,05, dans cas le nombre cycles effectuées est:

$$n_i = \frac{0,05 \times 3600 \times 24 \times 365 \times 10 \times V.I}{2pR} = 2,4 \times 10^7$$

L'amplitude de la contrainte dynamique est estimée à 30 MPa d'après la figure 4.8 et le nombre de cycles admissible N_i est infini selon la courbe de la figure 4.10.

Ce calcul est répété pour plusieurs intervalles de vitesse ce qui permet d'estimer la fatigue en utilisant la formule de Miner.

Le résultat de ce calcul est présenté par le tableau 4.1.

Tableau 4.1 calcul de la fatigue pale en alliage d'aluminium

Vitesse du vent (m/s)	4	7	11	15
Amplitude de la contrainte (Mpa)	10	30	80	175
n_i (cycles de fonctionnement)	$4,7 \times 10^7$	$2,4 \times 10^7$	$7,6 \times 10^6$	$4,1 \times 10^5$
Durée de vie N_i (cycle)	infinie	infinie	5×10^7	5×10^5

L'utilisation de la formule (4.16) permet d'écrire:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = \frac{7,6 \times 10^6}{5 \times 10^7} + \frac{4,1 \times 10^5}{5 \times 10^5} = 0,972$$

Selon la règle de Miner ces pales peuvent résister pour une durée de fonctionnement de dix ans, puisque le rapport $\sum_i \frac{n_i}{N_i}$ est inférieur à 1.

4.4.2 Calcul de la fatigue des pales en matériau composite:

Dans ce cas on prend une durée de fonctionnement de 20 ans.

Tableau 4.2 calcul de la fatigue pale en matériau composite

Vitesse du vent (m/s)	4	7	11	15
Amplitude de la contrainte (Mpa)	24	30	40	64
n_i (cycles de fonctionnement)	$9,4 \times 10^7$	$4,8 \times 10^7$	$1,5 \times 10^6$	$8,2 \times 10^5$
Durée de vie N_i (cycle)	infinie	infinie	10^{10}	10^8

De la même façon, on peut déduire que des pales en matériau composite et ayant le même profil peuvent résister la fatigue pendant vingt ans de fonctionnement.

4.5 CONCLUSION :

La résolution l'équation couplé (flexion-torsion) a permis de déterminer contraintes dynamiques pour une pale ayant une forme géométrique simple.

Aussi, la modélisation dynamique par éléments finis a permis d'estimer les contraintes dynamiques pour des pales de formes géométriques complexes, ayant différents profils.

Ce calcul a montré que les pales en matériaux composite sont plus résistantes que celle en alliage d'aluminium; le profil NACA 63-421 est mieux résistant que les profils S809, FX66-S196-V1 ou LS(1)-0417 cela est du à sa forme et à son épaisseur.

Selon la théorie de miner, l'hélice en matériaux composite avec un profil NACA 63-421 peut résister la fatigue une période proche de vingt ans.

Ce calcul de la fatigue est basé sur la modélisation statistique des vitesses du vent du site de Constantine (Ain Elbey).

Pour une estimation plus conservatrice de la fatigue, on peut utiliser la distribution statistique des vitesses maximales journalières (figure 4.9). Cette approche est préconisée pour les sites, où les données météorologiques ne sont disponibles que pour une courte durée [9].

Le calcul de la fatigue peut nous aider à faire le choix optimal des pales.

REFERENCES

- [1] N.Noda, "a simulation model for wind turbine blade fatigue loads ", journal of wind engineering N°83 1999
- [2] A. Bramwell, " *Helicopter dynamics*". Edward Arnold 1979.
- [3] J. Nougier, " *Méthode de calcul numérique*". Masson 1997.
- [4] W.C. De Goeij, "Implementation of bending-torsion coupling in the design of wind turbine rotor blade", Journal of applied energy, N° 63 1999.
- [5] M.A. Miner, "Cumulative damage in fatigue". Journal of applied mechanics , vol 16, Sept 1945.
- [6] R.C. Juvinall, "Stress strain and strength". Mc Graw Hill, 1980.
- [7] H.J. Sutherland "Summary Fatigue Properties WT Materials"*Wind Ener.3,1-34 (2000)*
- [8] H.J. Sutherland "Application of the U.S. high cycle fatigue data base to wind turbine blade lifetime predictions" *Proceeding of Energy Week ASME, 1996*
- [9] J.R.Maine "The Estimation of Extreme Winds". Journal of Industrial Aerodynamics, May 1979

Quatrième partie
Modélisation Statistique

Chapitre 5

Modélisation statistique du vent

Chapitre 5

Modélisation statistique du vent

5.1 Introduction

Le choix d'un site éolien est essentiel dans un projet de production de l'énergie éolienne, car l'énergie produite dépend des ressources éoliennes de ce site.

L'estimation de ces ressources présente une difficulté particulière à cause de la variabilité du vent, car la quantité d'énergie disponible dans un site varie avec la saison et l'heure du jour.

Les prévisions de ces ressources ainsi que l'adaptation d'une machine à un site se basent sur la distribution statistique des vitesses du vent de ce site.

Cette répartition statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à un autre puisque qu'elle dépend des conditions climatiques locales, du paysage et sa surface.

Les caractéristiques du vent dans un site (vitesses moyenne, fréquences, directions..) aident à estimer la quantité d'énergie extraite effectivement du gisement éolien, puisque ces paramètres influent directement sur le fonctionnement des éoliennes (démarrage, arrêt, orientation, etc.)

Ces informations sont aussi nécessaires pour optimiser la conception des éoliennes dans le but de maximiser l'énergie extraite et de minimiser les coûts liés à la production d'électricité. La répartition statistique (la fréquence de chaque vitesse) est aussi nécessaire pour le calcul de la fatigue, car elle permet d'estimer le nombre de cycles de fonctionnement, pendant la durée d'utilisation de la machine.

Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps (un à dix ans), sont nécessaires. Une fois qu'une série de mesures des vitesses du vent est disponible pour une période suffisamment longue, on peut représenter ces données sous forme d'un histogramme (figure 5.1), où la fréquence relative (statistique) est tracée en fonction de la vitesse du vent.

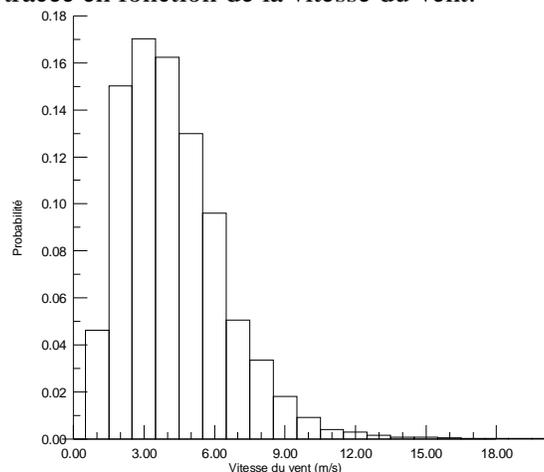


Figure 5.1 Histogramme des vitesses du vent

5.2 Loi de distribution statistique

Théoriquement, si les intervalles de la vitesse du vent sont rendus de plus en plus petits, l'histogramme se transforme en fonction de densité de probabilité.

L'utilisation d'une fonction continue au lieu d'un histogramme, permet de calculer les paramètres statistiques analytiquement (comme la vitesse moyenne, la médiane etc..).

Une approche pratique, pour obtenir la fonction de densité de probabilité, est d'utiliser une distribution statistique connue, semblable à l'histogramme obtenu.

La connaissance de la loi de distribution statistique de la vitesse du vent à partir des données mesurées du vent est utile pour les applications de l'énergie éolienne, car l'utilisation d'une représentation analytique de la cette loi de distribution présente des avantages certains.

C'est cette distribution approchée qui est utilisée dans les formules de la turbine au lieu de l'histogramme complet, ce qui simplifie grandement le calcul de la puissance produite par la turbine.

Dans le cas des données de vent, la loi distribution de Gauss ainsi que celle Rayleigh sont souvent inadaptées pour représenter statistiquement les vitesses du vent.

Une meilleure idée est d'utiliser la distribution de Weibull. Ce modèle qui a un aspect plus général, dans lequel les lois Gauss et de Rayleigh sont inclus comme des cas particuliers, est très commode pour représenter statistiquement les vitesses du vent.

Cette distribution statistique théorique donne généralement une bonne approximation de la plupart des histogrammes des vitesses de vent. Pour ces raisons, on décrit généralement les variations du vent sur un site donné par la distribution de Weibull, les avantages du modèle de Weibull à deux paramètres ont été pointés par Justus [1].

D'autres modèles de Weibull à trois paramètres ont été aussi suggérés par Stewart [2].

Le premier atlas de vent qui utilise la distribution Weibull a été réalisé pour le Danemark par Petersen [3]. Cet atlas est adapté surtout pour l'estimation de la puissance disponible du vent.

La loi de distribution de Weibull (la densité de probabilité) s'exprime au moyen de la formule suivante:

$$p(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (5.1)$$

qui comporte deux paramètres:

k est le paramètre de forme (sans dimension) caractérisant la dissymétrie de la distribution.

c est le paramètre d'échelle (dimension d'une vitesse), ce paramètre d'échelle est proportionnel à la vitesse moyenne.

Dans le cas où le paramètre de forme **k** est égal à 2, on obtient la distribution de Rayleigh.

La distribution de Weibull tend à varier, tant en forme qu'en valeur moyenne et on remarque d'après la figure 5.2 que la distribution des vitesses du vent est oblique, donc asymétrique.

La fréquence cumulée correspondante, qui exprime la probabilité pour que la vitesse du vent soit inférieure à une valeur donnée V_x , est obtenue en intégrant l'équation (5.1):

$$F(V_x) = p(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} p(V) dV = 1 - e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k} \quad (5.2)$$

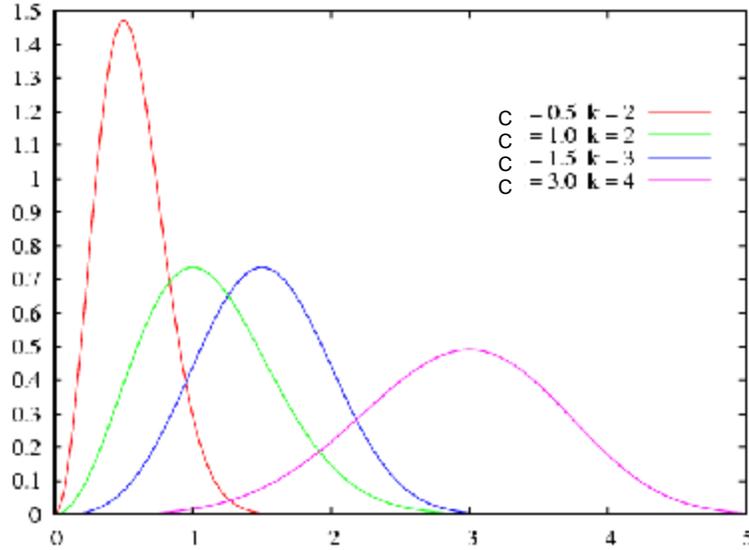


Figure 5.2 Distribution de Weibull

De la même façon, la probabilité pour que la vitesse du vent soit supérieure à une valeur donnée V_x est :

$$p(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} p(V) dV = 1 - p(V \leq V_x) = e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k} \quad (5.3)$$

La probabilité pour que la vitesse du vent soit comprise entre deux valeurs données V_x et V_y est :

$$p(V_x \leq V \leq V_y) = \int_{V_x}^{V_y} p(V) dV = e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_y}{c}\right)^k} \quad (5.4)$$

La distribution de Weibull est une distribution à deux paramètres (c et k), qui permet de déterminer quelques propriétés importantes de la distribution du vent en fonction de ces paramètres.

5.3 Détermination des paramètres statistiques du vent

Dans cette partie les différents paramètres statistiques du vent sont définis:

5.3.1 Vitesse modale

La valeur de la vitesse la plus fréquente (pour laquelle la probabilité est maximale) est dite la valeur modale de la distribution.

5.3.2 Vitesse médiane

L'équation (5.2) permet de déduire la médiane V_m de la vitesse du vent en résolvant l'équation :

$$\frac{1}{2} = e^{-\left(\frac{V_m}{c}\right)^k}$$

$$V_m = c (\ln 2)^{\frac{1}{k}} \quad (5.5)$$

5.3.3 Vitesse moyenne

La vitesse moyenne du vent est donnée par l'expression:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V p(V) dV = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5.6)$$

Où Γ est la fonction gamma, définie par la relation :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad \text{avec } x > 1 \quad (5.7)$$

Le rapport de la vitesse médiane et la vitesse moyenne dépendent uniquement de k :

$$\frac{V_m}{\bar{V}} = \frac{(\ln 2)^{\frac{1}{k}}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (5.8)$$

L'écart type S de la distribution est donné par:

$$S^2 = \int_0^{\infty} (V - \bar{V})^2 p(V) dV = c^2 \left(\Gamma(1 + \frac{2}{k}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{k}) \right) \quad (5.9)$$

5.3.4 La densité de puissance :

La puissance disponible du vent par unité de surface, varie proportionnellement avec le cube de la vitesse du vent, comme suit:

$$P = \frac{1}{2} r V^3 \quad (5.10)$$

Où r est la masse volumique de l'air, P est la puissance disponible du vent par unité de surface.

En multipliant la puissance de chaque vitesse de vent par la probabilité de l'occurrence de cette vitesse selon la distribution de Weibull, on obtient la distribution de l'énergie éolienne à des différentes vitesses de vent, cette dernière distribution est appelée aussi la densité de puissance.

On remarque que la nouvelle distribution obéit à la loi de Weill, mais change de forme comparée à la distribution précédente, du fait que ce sont les vents forts qui contiennent le plus d'énergie.

Il est important de noter qu'à des vitesses de vent supérieures à la vitesse moyenne sur le site en question que l'on trouve la plus grande partie de l'énergie éolienne récupérable.

La majeure partie de l'énergie éolienne est captable à des vitesses de vent deux fois supérieures à la vitesse de vent la plus fréquente.

La méthode utilisée pour estimer l'énergie éolienne potentielle sur divers site d'un territoire, consiste à calculer la puissance éolienne moyenne disponible par unité de surface:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} r \langle V^3 \rangle \quad (5.11)$$

Où $\langle V^3 \rangle$ est la valeur moyenne de V^3 .

Pour bien évaluer les ressources en énergie éolienne, des cartes de puissance éolienne moyenne disponible sont établies pour divers pays et régions.

A partir de ces données, il est possible de déduire l'énergie éolienne moyenne disponible sur une année, exprimée en kWh/m², en multipliant la puissance moyenne par 8760 (qui est le nombre d'heures par année). De la même façon il est possible d'obtenir l'énergie éolienne moyenne mensuelle.

L'inventaire de l'énergie éolienne effectué à l'échelle nationale et régionale permettrait de tirer des conclusions utiles, en ce qui concerne les sites énergétiquement intéressants.

Si on connaît uniquement la vitesse moyenne du vent \bar{V} , l'énergie éolienne moyenne disponible ne peut être estimée sauf si on dispose d'informations supplémentaires sur la fonction de distribution de la vitesse du vent $p(V)$.

D'où la nécessité de calculer la moyenne du cube de la vitesse du vent, $\langle V^3 \rangle$:

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 p(V) dV = c^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) \quad (5.12)$$

Le coefficient d'irrégularité $\frac{\langle V^3 \rangle}{\bar{V}^3}$, dépend uniquement de k :

$$\frac{\langle V^3 \rangle}{\bar{V}^3} = \frac{\Gamma(1 + \frac{3}{k})}{\Gamma^3(1 + \frac{1}{k})} \quad (5.13)$$

Ce coefficient n'est pas constant pour les lois de distribution des vitesses, mais il est en général compris 1,5 et 3 et sa valeur moyenne est proche de 2 [1].

Une propriété intéressante de la distribution de Weibull est la suivante: si V est une distribution Weibull de paramètres k et C , alors V élevé puissance m (V^m) est aussi une distribution Weill, ayant un paramètre de la forme $\frac{k}{m}$ et un paramètre de l'échelle C^m .

Cette propriété est utile, car elle est appliquée pour estimer la distribution de puissance du vent. Cette règle est vérifiée dans la formulation précédente, équation (5.12).

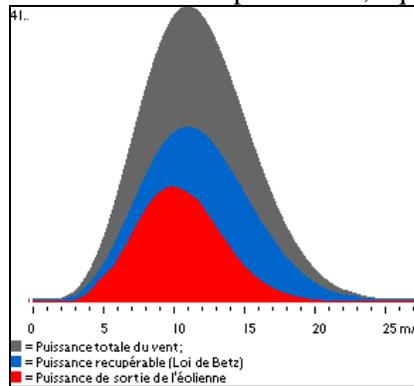


Figure 5.3 Distribution de puissance [4]

5.4 Méthodes de calcul des paramètres de la distribution de Weibull :

Plusieurs méthodes pour estimer les paramètres de la distribution de Weibull (c et k) sont proposées [1].

Dans ce travail deux méthodes sont présentées, la première est celle des moindres carrés utilisée pour ajuster la distribution cumulée des vitesses du vent. La deuxième est basée sur le calcul du premier et second moment de la distribution de Weibull.

5.4.1 Méthode des moindres carrés :

Les paramètres de Weibull peuvent être déterminés par ajustement des fréquences de la distribution cumulée des vitesses du vent, en utilisant la méthode des moindres carrés.

Cette méthode consiste à linéariser la fonction de la distribution cumulée en prenant deux fois le logarithme de l'équation (5.2) :

$$\ln[-\ln(1 - F(V))] = k \ln(V) - k \ln(c) \quad (5.14)$$

Puis calculer les coefficients d'ajustement a et b de la forme linéaire :

$$y = a x + b \quad (5.15)$$

A partir des données expérimentales, les valeurs de y_i et x_i sont déterminées pour chaque vitesse de la distribution [5]:

$$x_i = \ln V_i \quad (5.16)$$

$$y_i = \ln[-\ln(1 - F(V_i))] \quad (5.17)$$

L'utilisation de la méthode des moindres carrés pour des données ponctuelles x_i, y_i permet de déterminer les coefficients de régression a et b , ces coefficients permettent de remplacer les données expérimentales dispersées par une droite dont l'équation (5.15) .

L'application de cette méthode pour des données ponctuelles non pondérées conduit aux solutions :

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{D} \quad (5.18)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \sum_{i=1}^n X_i^2 - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{D} \quad (5.19)$$

Avec

$$D = n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \quad (5.20)$$

Chaque point peut être pondéré par un coefficient p_i qui est la fréquence observé pour l'intervalle.

Les paramètres de la distribution de Weibull (c et k) sont exprimés en fonction de a et b par les relations suivantes :

$$k = b \quad (5.21)$$

$$c = e^{\frac{b}{a}} \quad (5.22)$$

5.4.2 Méthode basée sur le calcul du premier et second moment de la distribution de Weibull:

L'expression du nième moment de la distribution de Weibull est donné par :

$$m_n = \int_0^{\infty} V^n p(V) dV = c^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (5.23)$$

Le premier et le second moment m_1 et m_2 sont liés par les relations suivantes :

$$c = \frac{m_2}{m_1} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} \quad (5.24)$$

$$\frac{m_2}{m_1^2} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} \quad (5.25)$$

Le premier et le second moment m_1 et m_2 peuvent être calculés par intégration numérique à partir des données météorologiques du vent [6].

L'équation (5.25) peut être formulée comme suit :

$$f(k) = 0 \quad (5.26)$$

Cette dernière équation peut être résolue par méthode itérative, comme celle de la sécante, pour déterminer la valeur de la racine k ; dans ce cas les valeurs de la fonction gamma sont calculées numériquement.

Cependant, le temps de calcul élevé peut poser, dans la pratique, un problème de convergence; car le volume de calcul impliqué dans cet algorithme est très important.

5.5 Résultats:

Les résultants suivants ont été obtenus pour plusieurs régions dans le territoire algérien, en se basant sur les données météorologiques.

Pour les coefficients de Weibull c et k , la méthode utilisée est celle des moindres carrés.

Selon les résultats du tableau 5.1 Adrar détient la plus grande vitesse moyenne, alors que Tindouf possède la puissance moyenne la plus élevée.

La totalité des courbes de distributions statistiques est présentée dans l'annexe III.

Tableau 5.1 paramètres statistiques pour plusieurs régions de l'Algérie

Ville	\bar{V} (m/s)	$\langle V^3 \rangle$	P_{Moy} (W/m ²)	Coef de Weibull	
				c(m/s)	k
Annaba	3,74	132,35	76,10	3,48	1,35
Adrar	6,12	400,25	230,15	6,28	1,92
Alger(D.Beida)	2,57	88,59	50,94	2,51	1,14
Bordj B.Arirdj	2,28	54,30	31,22	2,39	1,28
Bejaia	3,04	71,78	41,27	2,84	1,29
Constantine	2,31	82,48	47,43	2,50	1,14
El Kala	2,43	72,06	41,43	2,27	1,10
Guelma	1,98	62,88	36,16	2,10	1,05
Jijel	2,09	69,90	40,19	2,42	1,15
Mostaganem	2,15	56,16	32,29	2,23	1,14
Oran(Tefraoui)	3,16	103,89	59,74	3,07	1,28
Skikda	3,02	84,22	48,43	2,81	1,19
Sétif	3,70	117,80	67,73	3,66	1,56
Tindouf	5,44	418,00	240,33	5,73	1,61

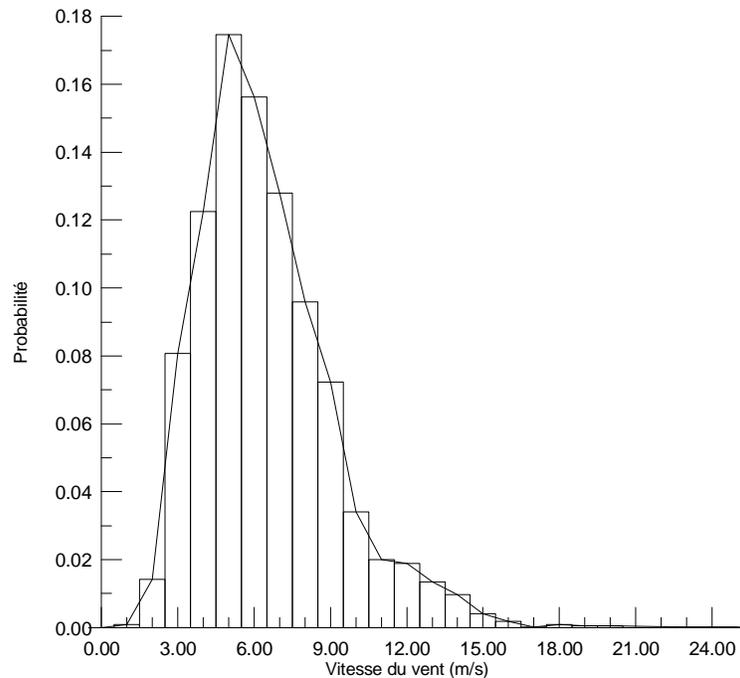


Figure 5.4 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville d'Adrar)

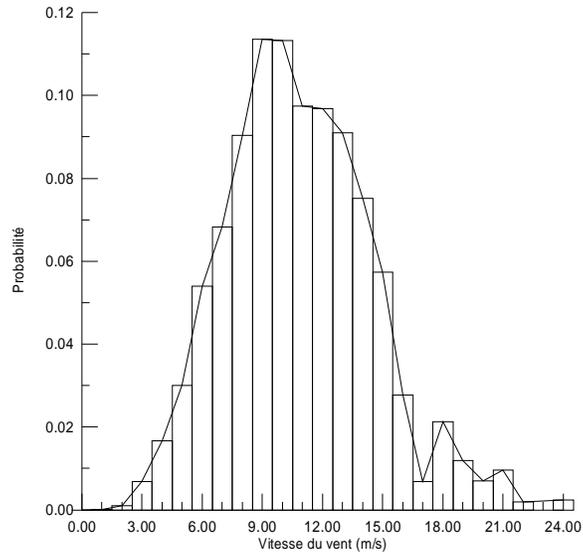


Figure 5.5 Densité de probabilité de la puissance moyenne (ville de Tindouf)

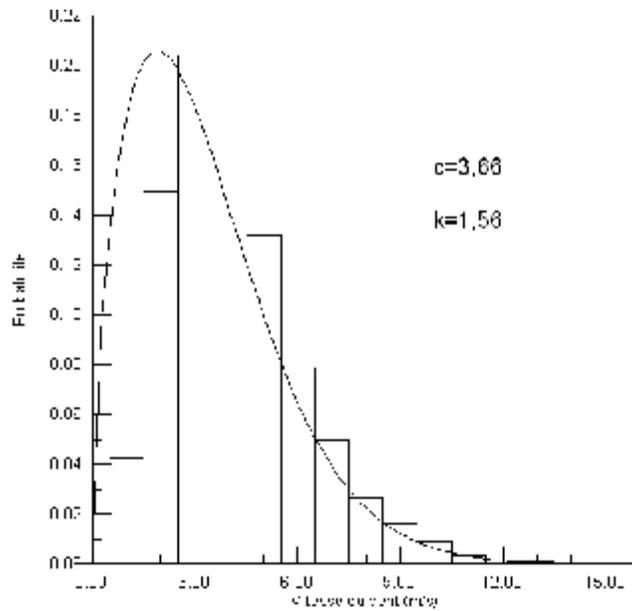


Figure 5.6 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville de Sétif)
 Comparaison de la distribution de Weibull avec les données météo

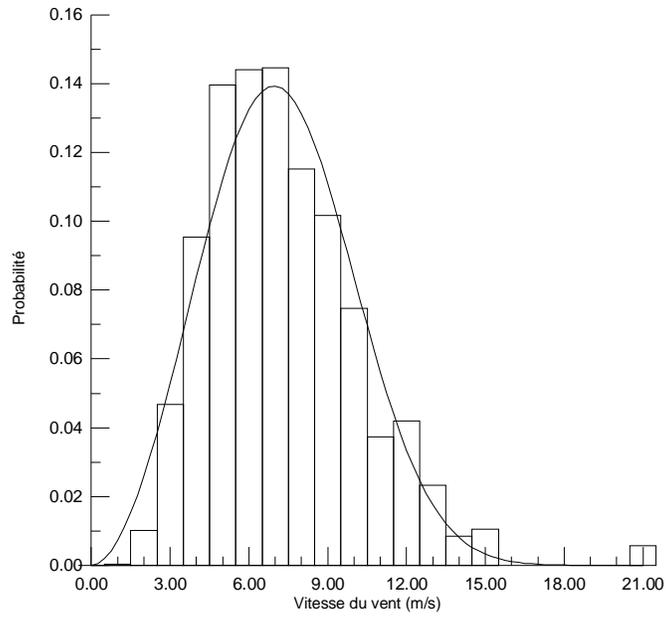


Figure 5.7 Densité de probabilité de la puissance moyenne (ville de Sétif)
 Comparaison de la distribution de Weibull avec les données météo

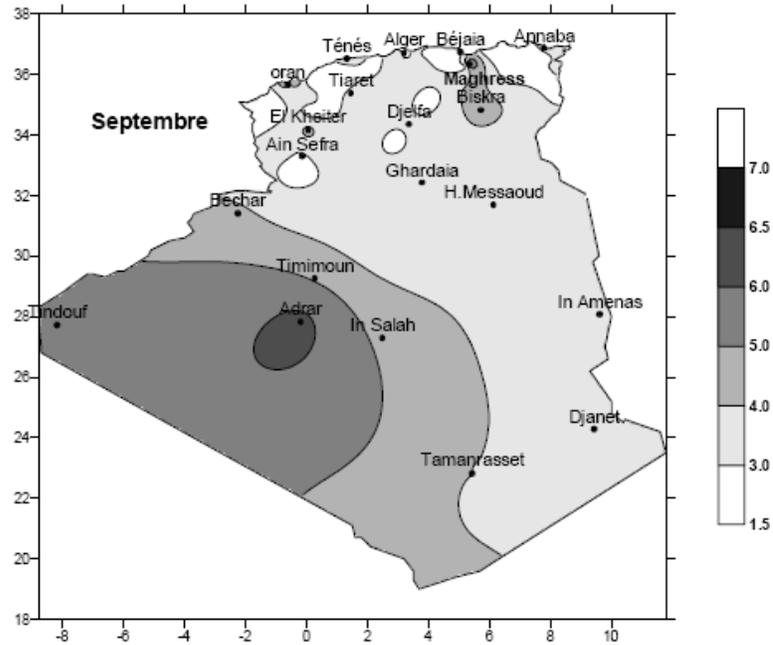


Figure 5.8 Carte mensuelle de la vitesse moyenne du vent en m/s à 10 m du sol réf [7]

5.6 Conclusion

Les paramètres statistiques ont été calculés pour plusieurs régions dans le territoire algérien en se basant sur les données météorologiques.

Selon les résultats du tableau 5.1 Adrar détient la plus grande vitesse moyenne, alors que Tindouf possède la puissance moyenne la plus élevée. La puissance moyenne est le paramètre le plus déterminant dans le choix d'un site éolien.

Ce résultat concorde avec la décision relative au choix du site, pour le projet éolien algérien prévu à Tindouf.

La conception optimale de l'hélice, pour un site donné, doit être basée sur la vitesse du vent qui donne le maximum d'énergie disponible. A titre d'exemple pour la ville de Sétif (Figure 5.7) cette vitesse est de 7 m/s.

Pour le calcul des coefficients de Weibull c et k , la méthode utilisée est celle des moindres carrés. Cette méthode converge facilement, contrairement à la deuxième méthode où des problèmes de convergence sont rencontrés.

La connaissance de ces coefficients, pour plusieurs sites d'un territoire donné, permet d'établir un atlas éolien. Cet atlas a pour utilité d'estimer l'énergie éolienne potentielle sur les divers sites et de déterminer ainsi les sites énergétiquement intéressants.

La connaissance de la répartition statistique (la fréquence de chaque vitesse) du site éolien est aussi nécessaire pour le calcul de la fatigue, car elle permet d'estimer le nombre de cycles de fonctionnement, pendant la durée d'utilisation de la machine.

Référence:

- [1] C.G.JUSTUS "Vent et performances des éoliennes" Editions SCM, Paris 1980.
- [2] Stewart, D. A., O. M. Essenwagner "Distribution of wind speed near surface" J. Applied Meteorology 17, 1633-1642, 1978.
- [3] Petersen E. L., Troen. I, Frandsen. S, K. Hedegaard, "Wind Atlas for Denmark" Riso National Laboratory, pp.229, 1981.
- [4] <http://www.windpower.org/en/tour/wres/powdensi.htm>
- [5] E.G.Pavia "Weibull statistics of wind speed over the ocean" Journal of climate and applied meteorology, Volume 25 1986.
- [6] Russia's Weather Server - Weather Archive (Site internet)
http://meteo.infospace.ru/wcarch/html/e_sel_stn.sht?adm=3
- [7] L. Aiche-Hamane et A. Khellaf "Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie " Revue des Energies Renouvelable, 147-152, ICPWE (2003).

CONCLUSION

Conclusion

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. Ces efforts serviront aussi bien pour évaluer les performances énergétiques que pour analyser la structure de l'hélice.

La conception optimale de l'hélice, 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 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 la méthode.

Pour l'analyse modale des pales deux méthodes sont utilisées, leurs résultats sont comparés. Les fréquences calculées par ces deux approches ont le même ordre de grandeur, les modes propres correspondants ont des formes similaires.

Ces modes sont aussi confrontées avec ceux présentés dans d'autres travaux.

On peut conclure que la première approche (la résolution de l'équation différentielle du mouvement) est un outil pratique est peu coûteux pour estimer les modes propres, malgré sa limitation comparée à des logiciels sophistiqués comme ANSYS.

La résolution l'équation couplé (flexion-torsion) a permis de déterminer contraintes dynamiques pour une pale ayant une forme géométrique simple.

Aussi La modélisation dynamiques par éléments finis a permis d'estimer contraintes dynamiques pour des pales de formes géométriques complexes, ayant différents profils et différents matériaux.

Ce calcul a montré que les pales en matériaux composite sont plus résistantes que celles en alliage d'aluminium, aussi le profil NACA 63-421 est le mieux adapté, parmi ceux étudiés, car il obéit aux exigences de la résistance et de la performance. Cela est dû à ces caractéristiques géométriques (sa forme et à son épaisseur).

Selon la théorie de la fatigue cumulée de miner, l'hélice utilisant le profil NACA 63-421 peut résister pour une durée de fonctionnement de vingt ans, avec une vitesse maximale de fonctionnement avoisinant 20 m/s.

Ce calcul de la fatigue est basé sur la modélisation statistique des vitesses du vent utilisant les données météorologiques de la ville de Constantine.

Selon les résultats de la modélisation statistique de plusieurs sites algériens, Adrar détient la plus grande vitesse moyenne, alors que Tindouf possède la puissance moyenne la plus élevée. La puissance moyenne est le paramètre le plus déterminant dans le choix du site éolien.

ANNEXE I

Profils aérodynamiques

A. Profils aérodynamiques et leur utilisation dans les aérogénérateurs

1. Caractéristiques des profils aérodynamiques :

Le profil aérodynamique est le paramètre le plus important dans la conception des pales d'un aérogénérateur, car les performances énergétiques de la machine dépendent directement de la forme aérodynamique de ces pales.

Dans la figure 1 le point situé le plus à gauche est le bord d'attaque, celui situé le plus à droite est le bord de fuite.

La corde est le segment liant le bord d'attaque et le bord de fuite, l'écoulement de l'air se fait de gauche à droite.

L'angle d'incidence (d'attaque) est celui que fait la corde avec la vitesse relative du vent.



Figure A1.1 Profil aérodynamique

Pour un profil donné, les forces aérodynamiques agissantes sont la portance F_l et la traînée.

Ces forces sont données par les deux expressions suivantes :

$$F_l = \frac{1}{2} C_l r V_0^2 A \quad (1)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d r V_0^2 A \quad (2)$$

Où :

C_l : est le coefficient de la portance.

C_d : est le coefficient de la traînée.

r : est la masse volumique de l'air.

V_0 : est la vitesse de l'air.

A : est la surface de la pale.

Les coefficients de portance et de traînée dépendent de l'angle d'incidence ainsi que du nombre de Reynolds (Re) :

$$C_d = f_2(a, Re)$$

$$C_l = f_1(a, Re)$$

Avec :

$$Re = \frac{V_0 C}{n}$$

a : est l'angle d'incidence

n : est la viscosité dynamique de l'air.

Les figures A1.2 et A1.3 représentent respectivement les courbes des coefficients de portance et de traînée en fonction de a , pour un profil SG6040.

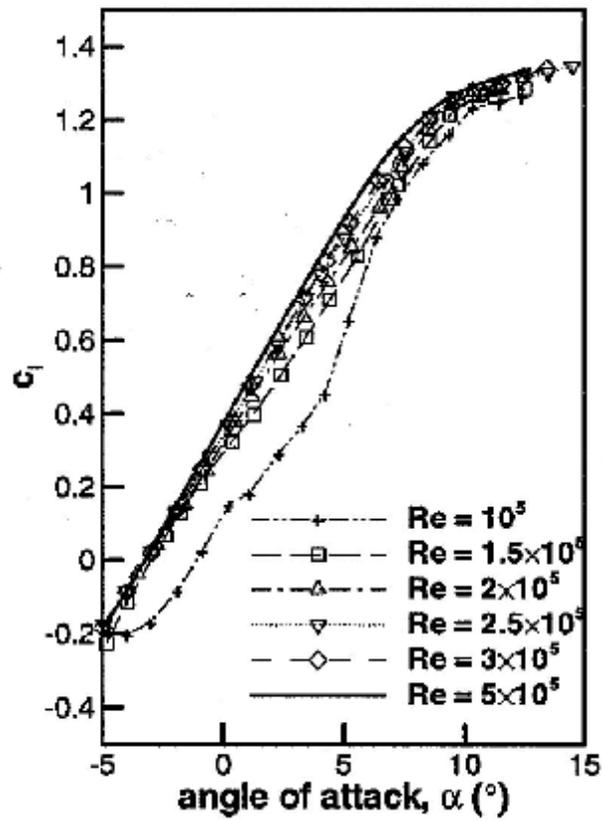


Figure A1.2 Courbe de portance [1]

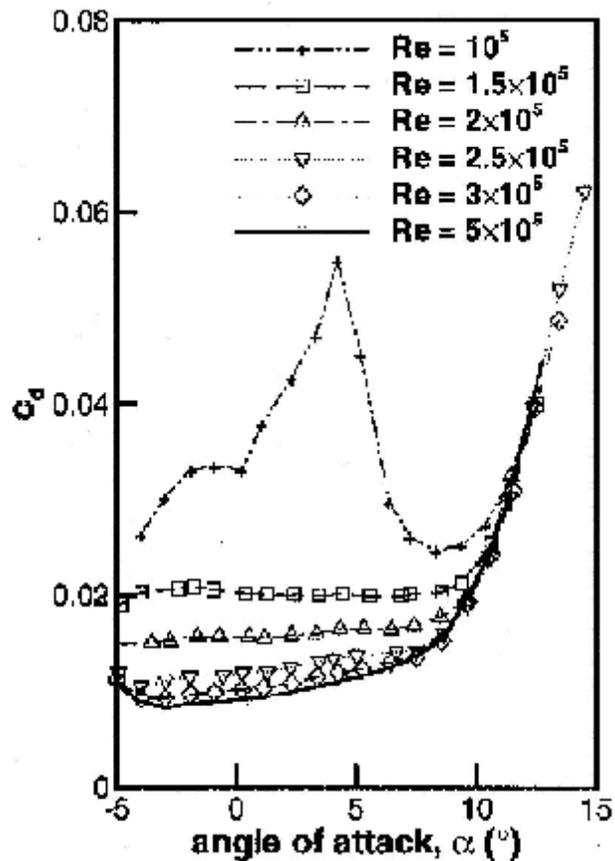


Figure A1.3 Courbe traînée [1]

On remarque d'après la courbe de C_l , qu'il existe un intervalle de α pour lequel la courbe est linéaire. La linéarité de la courbe s'achève avant que α atteigne la valeur de 10° , où C_d commence à croître rapidement, après avoir maintenu une valeur presque constante.

Des théories aérodynamiques comme celle «des profils minces», tentent de trouver cette relation linéaire entre C_l et α .

Mc Croskey [2] a développé la formule empirique suivante, qui donne la partie linéaire du coefficient de portance C_l pour le profil NACA0012, en se basant sur une grande quantité de mesures expérimentales en soufflerie :

$$\frac{dC_l}{d\alpha} = 0,1025 + 0,00485 \log_{10} \left(\frac{Re}{10^6} \right) \quad (3)$$

Le profil NACA0012 est probablement le profil aérodynamique le plus étudié à cause de son utilisation diverse dans l'aéronautique (pales d'hélicoptère, ailettes..) ainsi que dans les aérogénérateurs.

La figure A1.4 donne la courbe de C_l en fonction de C_d , le maximum de ce rapport, est atteint avant la fin de la zone linéaire.

Il est à noter que ce rapport $\frac{C_l}{C_d}$ est le paramètre déterminant dans le dimensionnement de

l'aérogénérateur, plutôt que les valeurs individuelles de C_l et C_d .

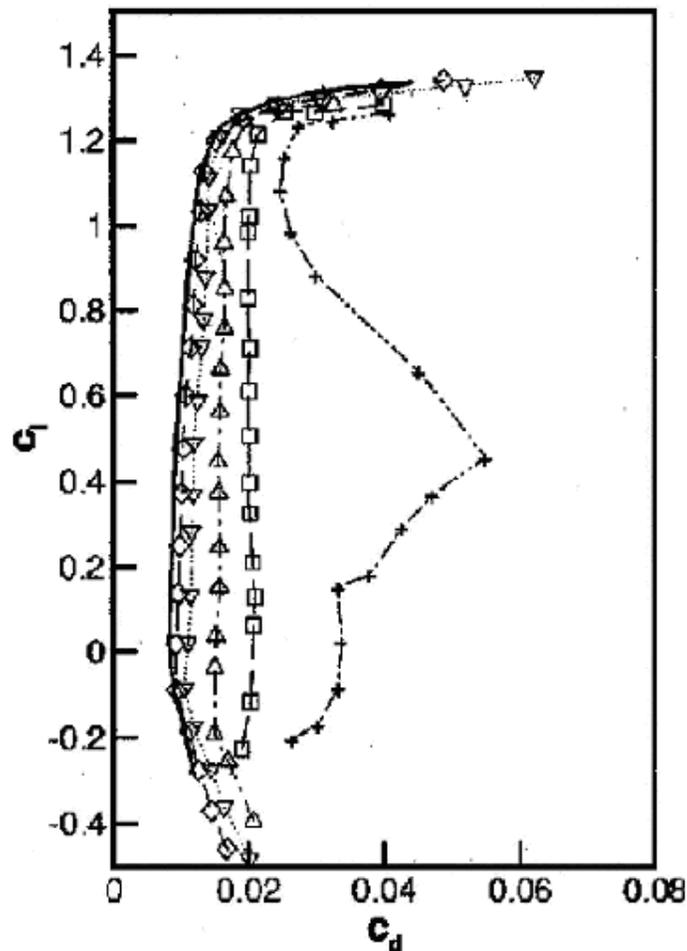


Figure A1.4 Courbe C_l - C_d [1]

2. Développements des profils aérodynamiques :

Parmi les développements relativement récents dans la conception des profils, la famille de profils minces introduite par Tangler [3] de l'institution solar energy resources institute (SERI) de Colorado. Ces pales ont été décrites par Davidson [4] comme « les pales du futur », qui affirme que ces pales peuvent produire 31% plus de puissance que les pales danoises traditionnelles. Le profil SERI S897 est un exemple de cette famille.

Un autre exemple des profils modernes sont les profils SG, développés récemment par les professeurs : Michael Selig (S) et Phillippe Giguere (G) de l'université d'Illinois (USA) [5]. Ces profils sont conçus spécialement pour des éoliennes de petites taille, ils sont probablement les seuls profils conçus spécifiquement pour cette tâche. Les caractéristiques de base de ses profils sont données par le tableau 1.

Tableau A1.1 Caractéristiques des profils SG [6]

Profil	t/c (%)	Camber (%)	C_l	Re
SG6040	16	2,5	1,1	200.000
SG6041	10	2	0,6	500.000
SG6042	10	3,8	0,9	333.333
SG6043	10	5,5	1,2	250.000

Le profil SG6040 de 16% d'épaisseur est conçu pour la partie intérieure de la pale, alors que les trois autres dont l'épaisseur est de 10%, sont conçus pour la partie extérieure de la pale. L'utilisation des profil NACA (US National Advisory Committee on Aerodynamics) de la NASA, dans le domaine éolien reste toujours très répondeue.

L'ancienne série de profils NACA23xxx, utilisées pendant longtemps pour les pales des aérogénérateurs, est actuellement abandonnée vu que ce profil perd ces qualités aérodynamiques (chute considérable de son $C_{l,max}$) quand sa surface devient rigoureuse avec le dépôt des impureté(insectes, poussières etc..) [7]

Ce même problème a été aussi constaté lors de l'utilisation de la série NACA 44xxx, mais à un degré moindre.

Dans un effort de résoudre ce problème de sensibilité du $C_{l,max}$ à la rugosité, les fabricants se sont tournés vers les familles de profils NACA63xxx et LS-1. Ces profils ont porté une solution à ce problème.

Le profil NACA63xxx est très utilisé dans la conception des pales modernes, ce type de profil a montré d'excellentes propriétés lors de son utilisation dans les aérogénérateurs.

Néanmoins certaines améliorations étaient nécessaires, car l'un des défis de la conception de profils pour les aérogénérateurs est de développer des profils, adaptés pour la zone intérieure des pales, ayant une épaisseur suffisamment grande pour résister les contraintes élevées appliquées dans le voisinage de l'encastrement, tout en maintenant un coefficient de portance élevé.

Parmi les exemples de profils épais conçus pour cette raison, on cite le profil NACA63-621, le profil LS1-421 et le profil S897. Ces pales épaisses sont mieux adaptées pour la zone intérieure, car cette épaisseur rend la pale plus résistante et permettra une transition géométrique progressive (de l'encastrement où la section est circulaire vers le profil aérodynamique).

Les profils caractérisés par un $C_{l,max}$ assez bas, représentent un inconvénient quand ils sont utilisés dans la zone intérieure de la pale (vers l'encastrement) car ils diminuent le rendement énergétique. Mais cet aspect s'avère avantageux dans la zone extérieure de la pale (vers le bout), car il limite l'excès de puissance, qui représente un risque pour la structure.

Pour les profils caractérisés par un $C_{l,max}$ élevé, le problème est complètement inversé. Ce type de profil est avantageux dans la zone intérieure du rotor, par contre il représente un inconvénient dans la zone extérieure.

Pour éviter ces inconvénients, certaines pales ont été conçues avec des profils différents dans chaque zone. Dans la zone intermédiaire le profil change de forme progressivement afin de permettre le passage d'un profil à un autre [7].

Il est évident, qu'en dépit de ces nouveautés dans la conception des profils, des améliorations peuvent toujours être apportées.

3. Quelques particularités des profils utilisés pour les éoliennes à axe horizontal:

La plupart des profils ont été conçus pour le domaine d'aéronautique (aile d'avion, pale d'hélicoptère etc...), il en résulte que les données expérimentales et théoriques fournies pour ces profils sont adaptées à ce type d'applications plutôt que pour le domaine éolien.

Le premier problème constaté est relatif au nombre Reynolds (Re) car les données de ces profils comme les coefficients de portance, de traînée et du moment sont fournies pour des valeurs élevées de Re , cette plage est adaptée pour des applications dans le domaine de l'aéronautique, alors que les petites éoliennes fonctionnent sous des petites valeurs de Re .

Le second problème est lié au manque de données pour des angles d'incidence élevés, ce cas se produit pendant le démarrage de l'aérogénérateur où la vitesse de rotation est faible.

3.1. Caractéristiques des profils pour des petites valeurs de Re :

Les aérogénérateurs de grande taille, fonctionnent à des valeurs élevées de Re ($Re > 500.000$), cela est surtout vrai pour le bout de la pale, alors que ceux de petite taille fonctionnent sous un Re inférieur à cette limite. Si on prend le cas de très petites (micro) éoliennes elles ont des micro-nombres de Reynolds environ 10.000 ou moins, à des faibles vitesses du vent.

A titre d'exemple, pour une éolienne de 600 W le Re ne dépasse pas la valeur 6000.

Le manque de données dans ce cas est dû d'abord au fait que la quasi-totalité des profils ont été développée pour l'aéronautique (pour des valeurs élevées Re), en plus de la difficulté pratique de mesurer avec précision les petites forces appliquées dans ce cas.

Hernandez [8] a suggéré l'approximation suivante :

Pour une plage de Re entre 10^5 et 10^7 , C_l reste relativement constant et C_d varie inversement avec Re selon la formule suivante:

$$C_d = C_{d,Re_{ref}} \left(\frac{Re_{ref}}{Re} \right)^{0,2} \quad (4)$$

Où :

Re_{ref} : est le nombre de Reynolds pour lequel les données du profil sont disponibles.

Il est à noter que cette formule représente une approche très simplifiée pour obtenir C_d à des valeurs faibles de Re , mais en réalité le comportement de C_d en fonction de Re peut s'avérer très complexe.

4. Caractéristiques des profils à des valeurs élevées de l'angle d'incidence (α) :

L'autre situation où les données de profils sont manquantes est celle où l'angle d'incidence a une valeur élevée ; cela n'est pas un phénomène rencontré uniquement dans le cas des éoliennes à axe vertical mais il est aussi bien partagé par les éoliennes à axe horizontal.

Pendant le démarrage la vitesse de rotation est faible, cela implique que la vitesse relative du vent est orientée de telle façon que l'angle d'incidence est maximal.

Les caractéristiques du profil à un angle d'incidence élevé sont utiles dans le cas des éoliennes, car elles permettent d'étudier les performances du démarrage.

Ostawari et Naik [9] ont mesuré la portance et la traînée d'un certain nombre de profils NACA à quatre chiffres. La figure A1.5 donne C_l et C_d de ce type profil, pour un intervalle large de l'angle d'incidence; sachant que cette figure est donnée plutôt pour montrer l'aspect qualitatif qui révèle le comportement global des profils comme celui de NACA 4412.

Il est intéressant de noter que C_l maintient une valeur assez élevée même après le décrochage, jusqu'au point où α atteint la valeur de 60° .

Les profils suffisamment minces, à un angle d'incidence de 90° , se comportent presque comme une plaque mince bidimensionnelle, normale à la direction de l'écoulement de l'air. Dans ce cas $C_l \approx 0$ et $C_d \approx 2$.

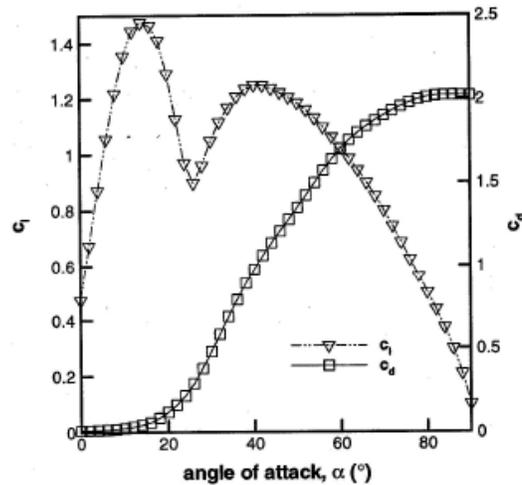


Figure A1.5 C_l et C_d pour un intervalle large de α [1]

B. Caractéristiques aérodynamiques des profils [10]

1) Profil NACA 63-421

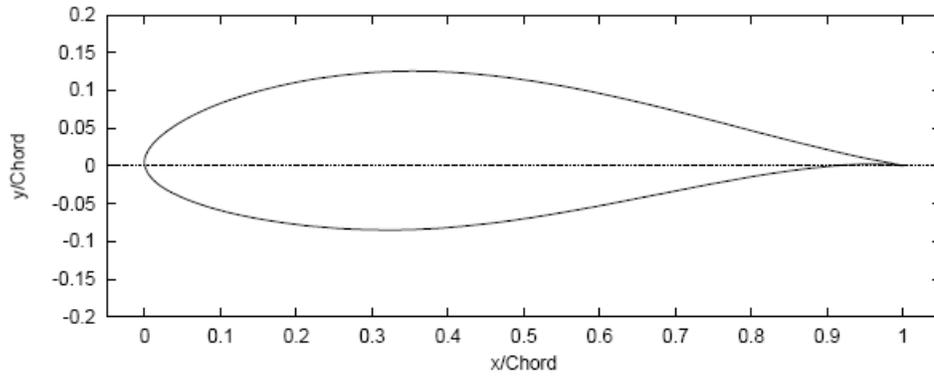


Figure A1.6 Profil NACA63-421

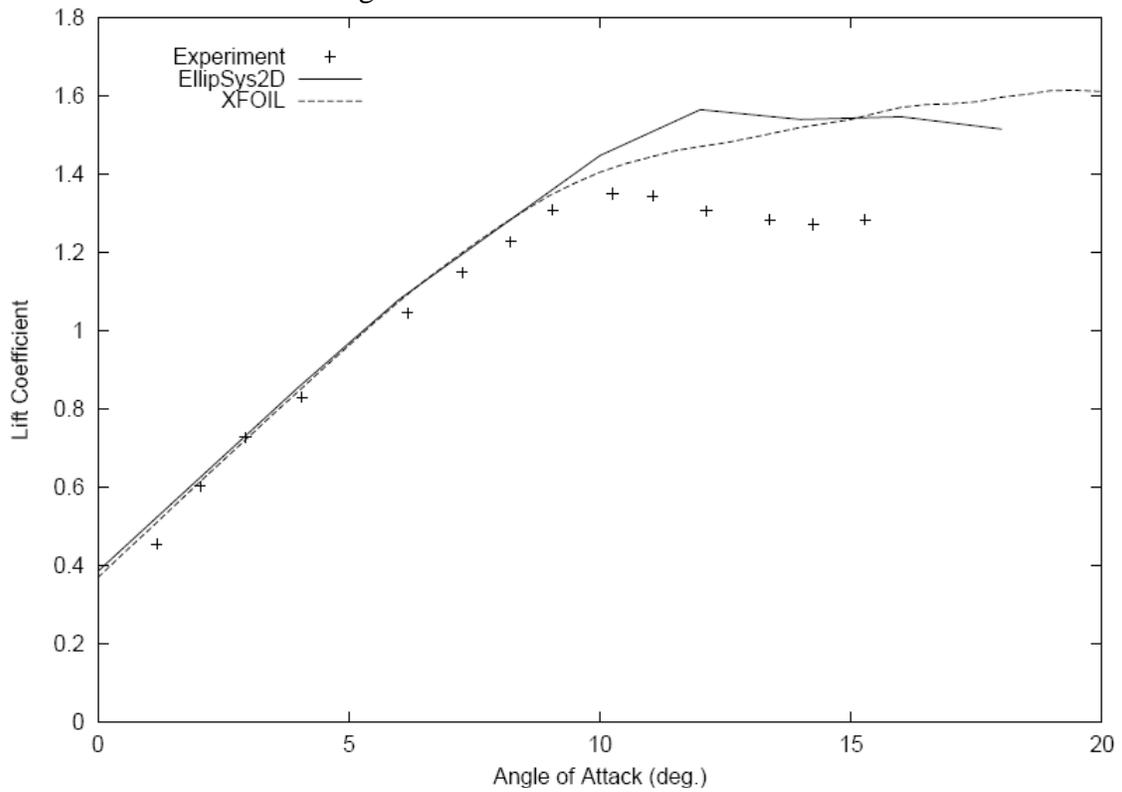


Figure A1.7 Coefficient de portance

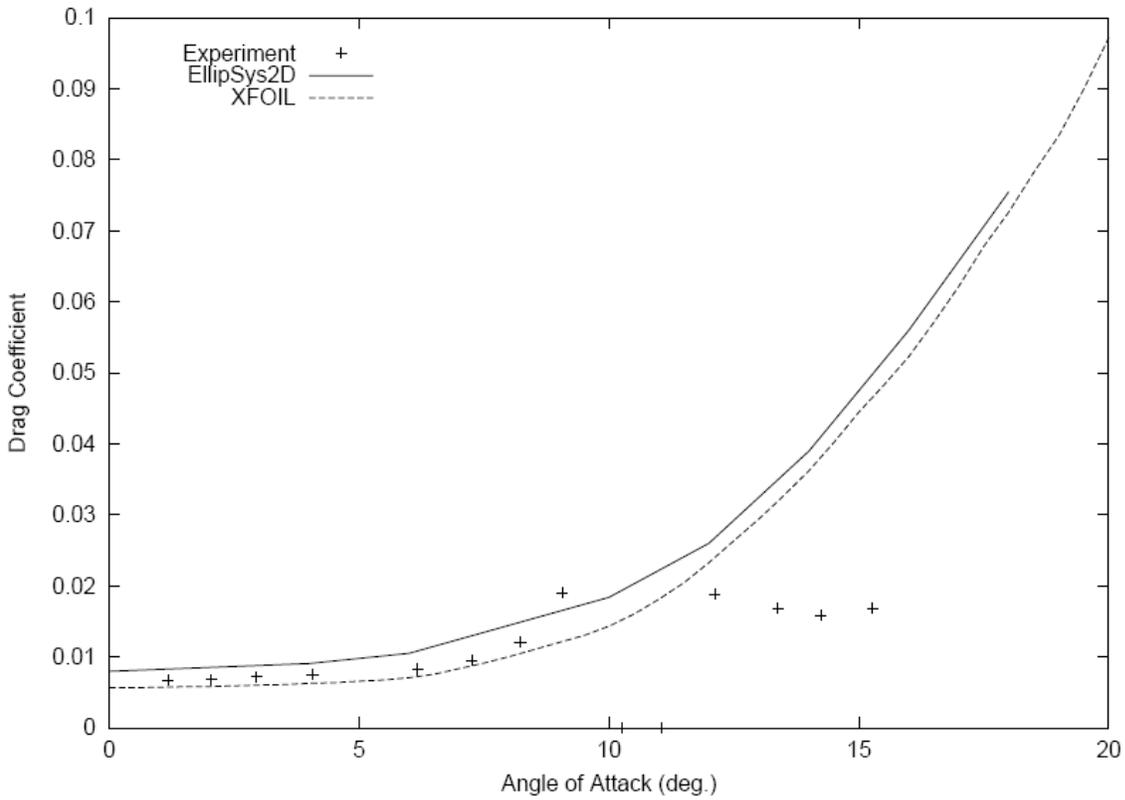


Figure A1.8 Coefficient de trainée

2) Profil FX66-S196-V1

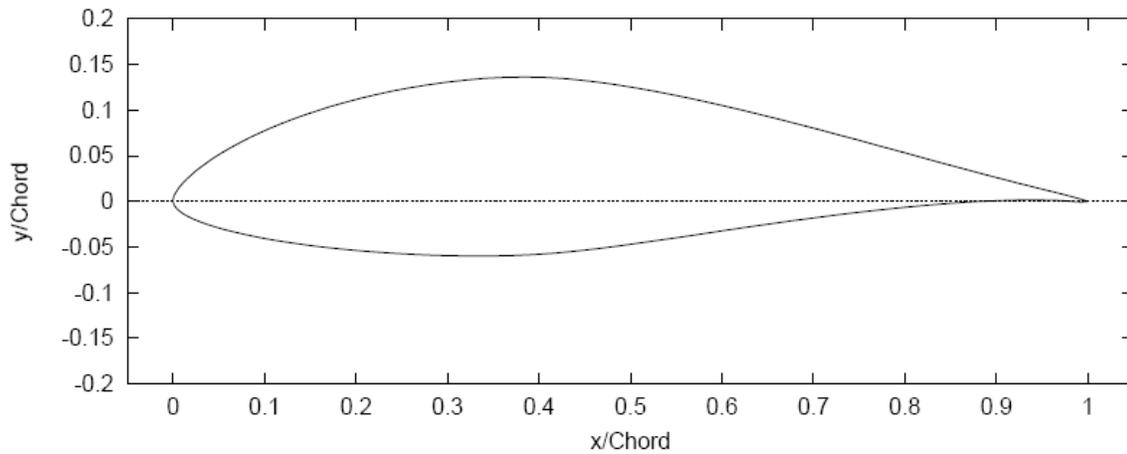


Figure A1.9 Profil FX66-S196-V1

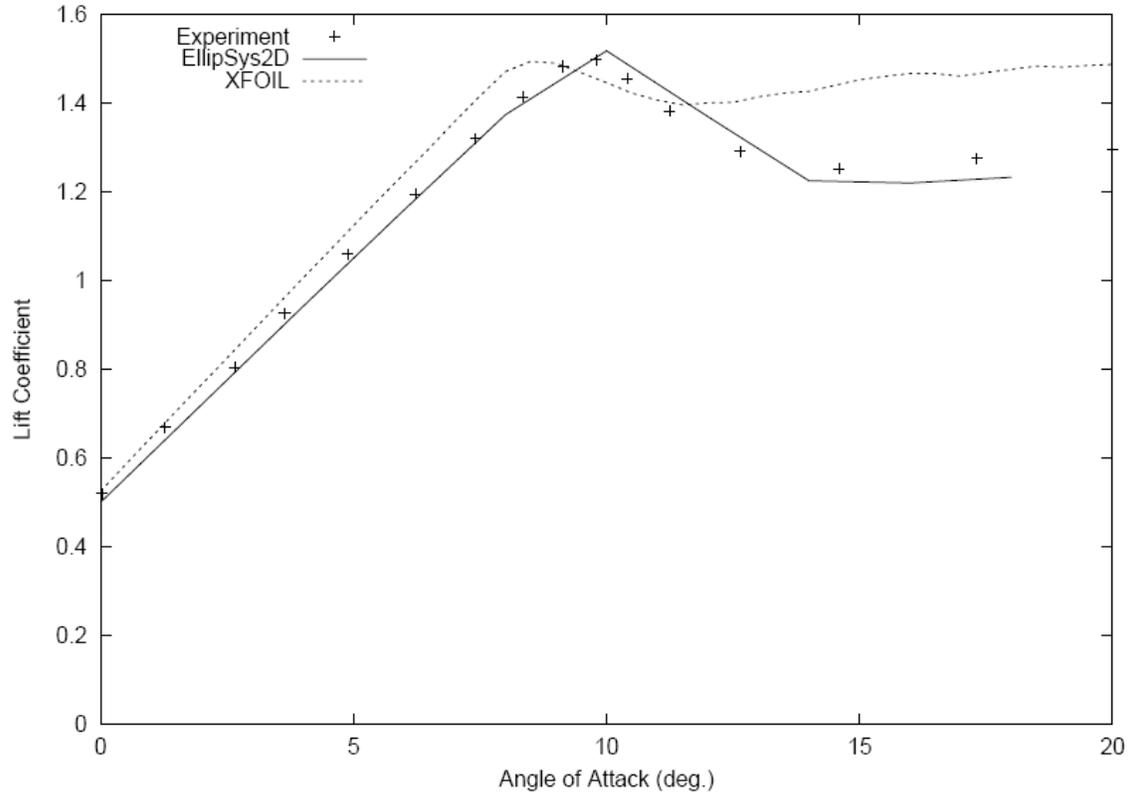


Figure A1.10 Coefficient de portance

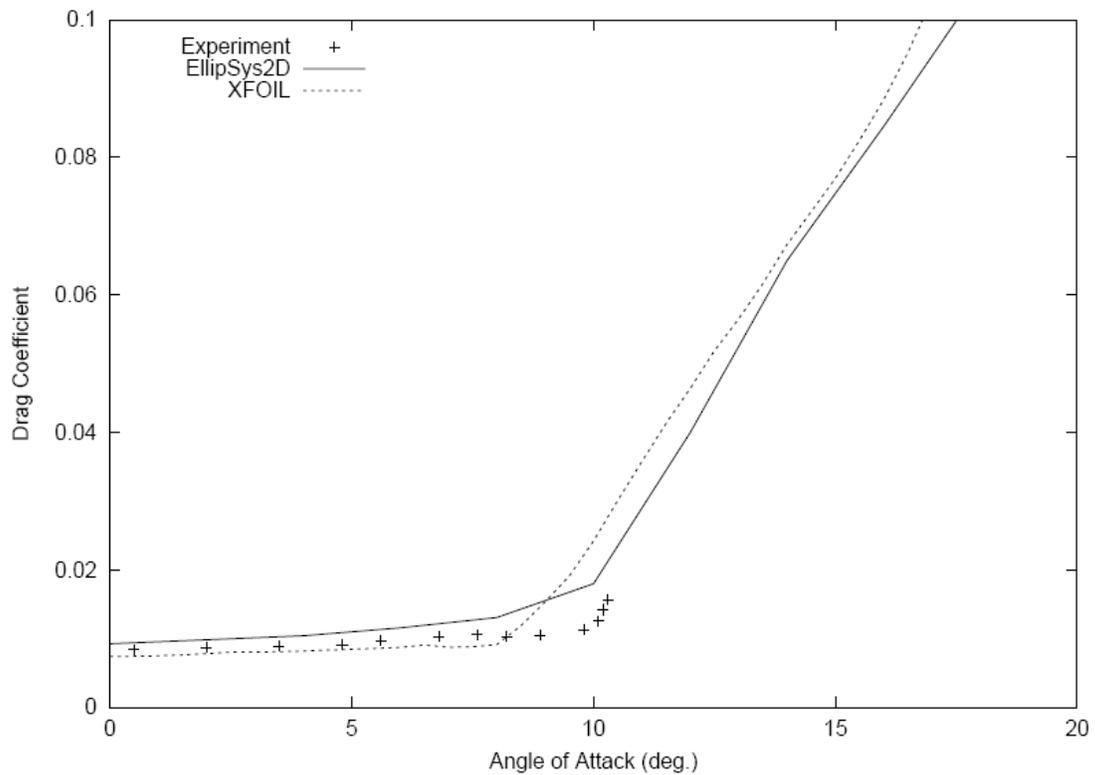


Figure A1.11 Coefficient de trainée

3) Profil S809

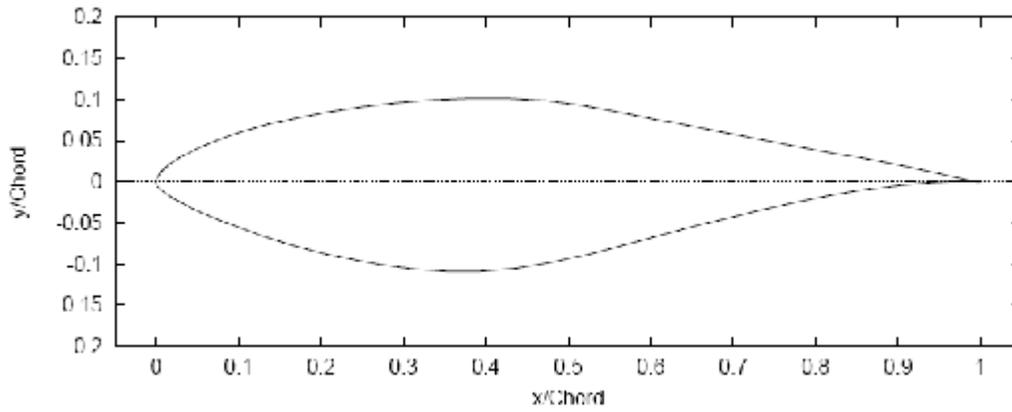


Figure A1.12 Profil S809

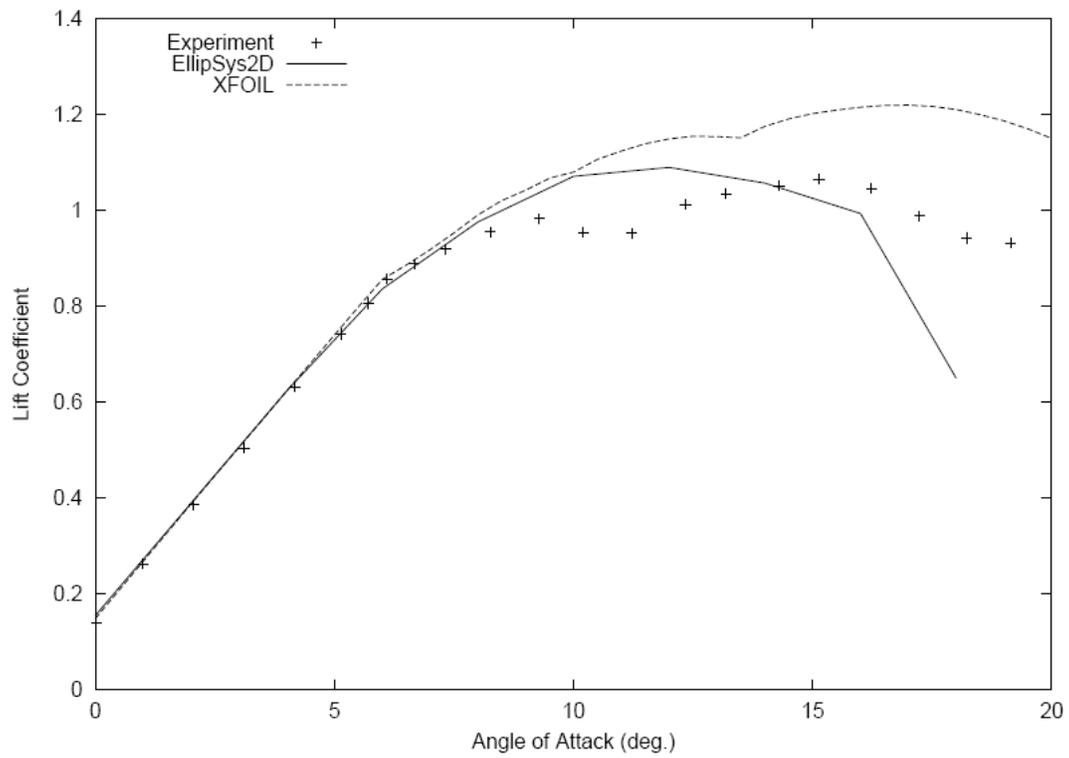


Figure A1.13 Coefficient de portance

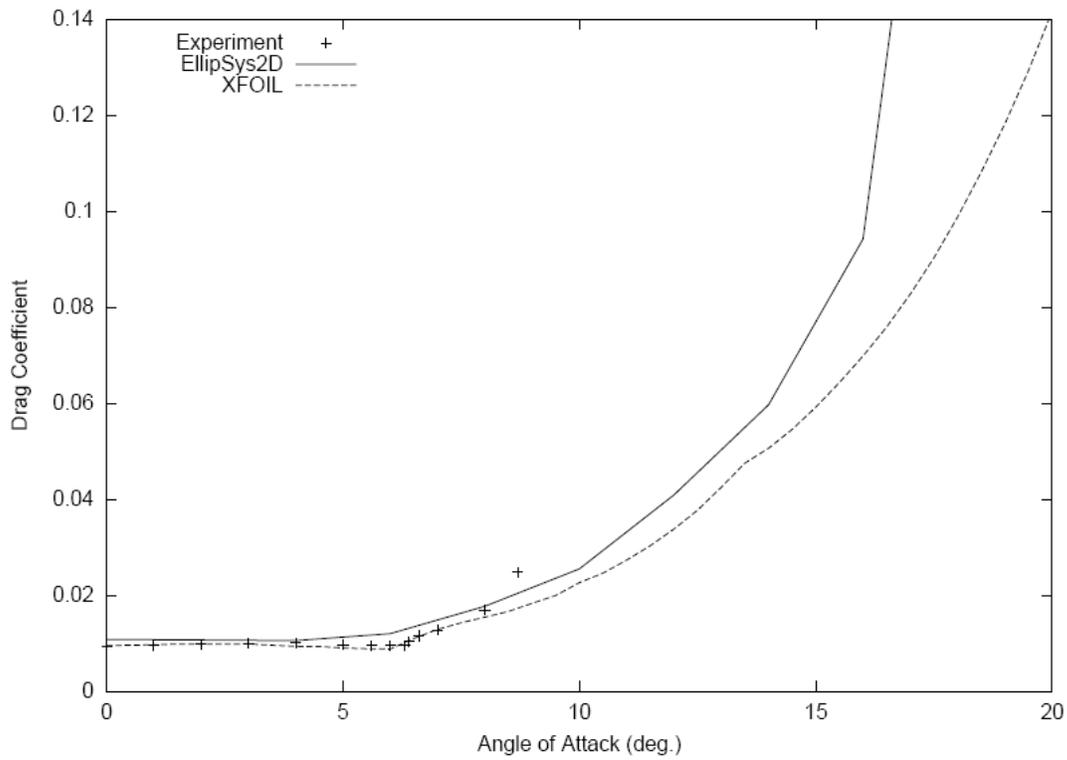


Figure A1.14 Coefficient de trainée

4) Profil LS(1)-0417

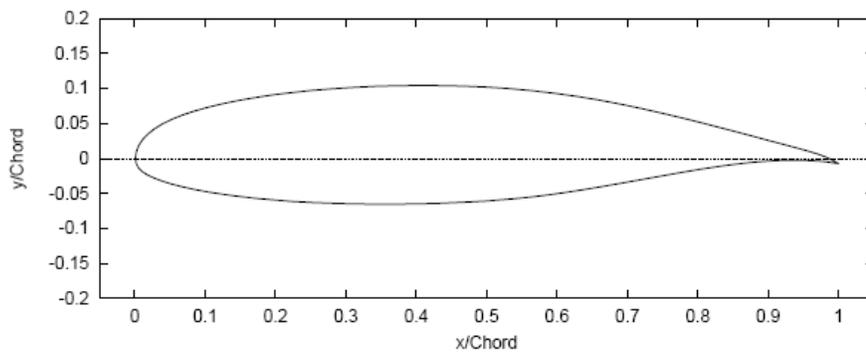


Figure A1.15 Profil LS(1)-0417

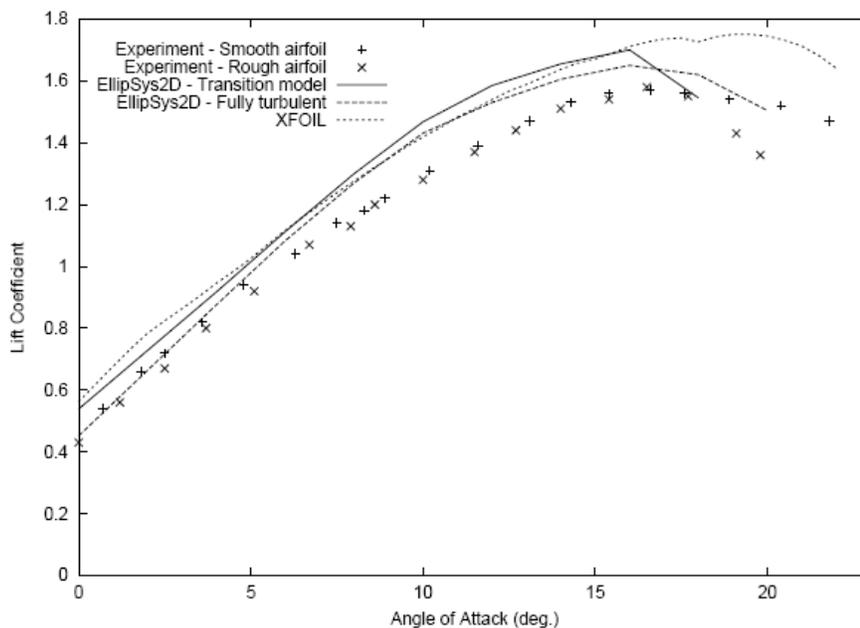


Figure A1.16 Coefficient de portance

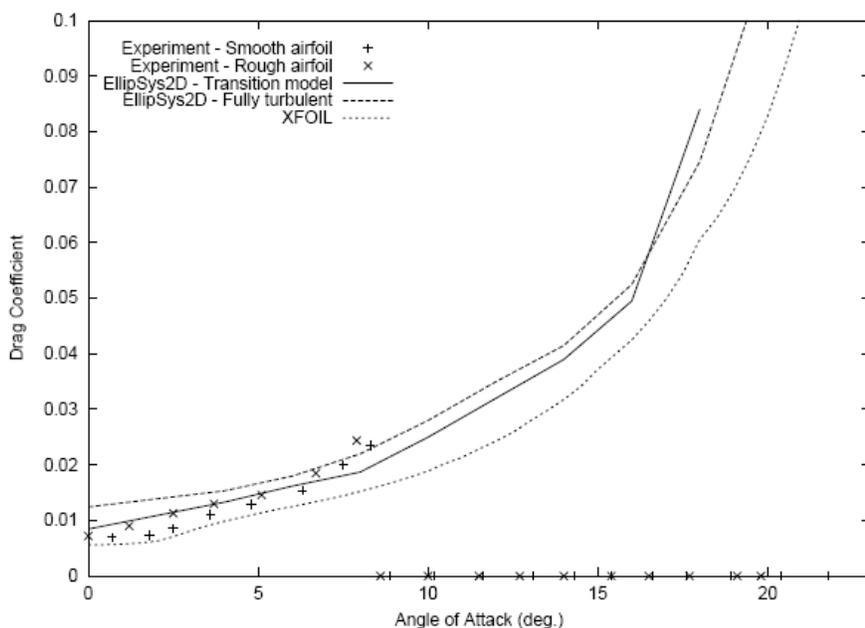


Figure A1.17 Coefficient de trainée

Références :

- [1] D.Wood "The design and analysis of small wind turbines" University of Newcastle School of Engineering NSW 2308 Australia, 1st edition of Notes 2002
- [2] McCROSKEY, W. J. (1987). *A Critical Assessment of Wind Tunnel Results for the NACA0012 Airfoil*, NASA Technical Memorandum 100019.
- [3] Tangler, J. L., 2000, "The Evolution of Rotor and Blade Design," NREL/CP-500-28410, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO.

-
- [4] Davidson R. Danes to test run new american blades. Windpower monthly.
- [5] GIGUERE, P. and SELIG, M. S. (1998). New Airfoils for Small Horizontal-Axis Wind Turbines, Transactions A.S.M.E., *Journal of Solar Energy Engineering*, **120**, 108 – 114
- [6] GIGUERE, P. and SELIG, M. S. (1997). Low Reynolds Number Airfoils for Small Horizontal-Axis Wind Turbines, *Wind Engineering*, **21**, 367 – 380.
- [7] S.M. Habali , 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. *Energy Conversion & Management* 41 (2000) 249-280
- [8] Hernandez, J., and Crespo, A., 1987, “Aerodynamics Calculation of the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines and Comparison with Experimental Results,” *Wind Eng.*, 11(4), pp. 177–187.
- [9] OSTOWARI, C. and NAIK, D.(1984). Post Stall Characteristics of Untwisted Varying Aspect Ratio Blades with an NACA 4415 Airfoil Section, *Wind Engineering*, 8, 176 – 194.
- [10] F.Bertagnolio, N.Sorensen « Wind Turbine Airfoil Catalogue » Riso (National Laboratory, Roskilde), Denmark August 2001.

ANNEXE II

Courbes des contraintes dynamiques

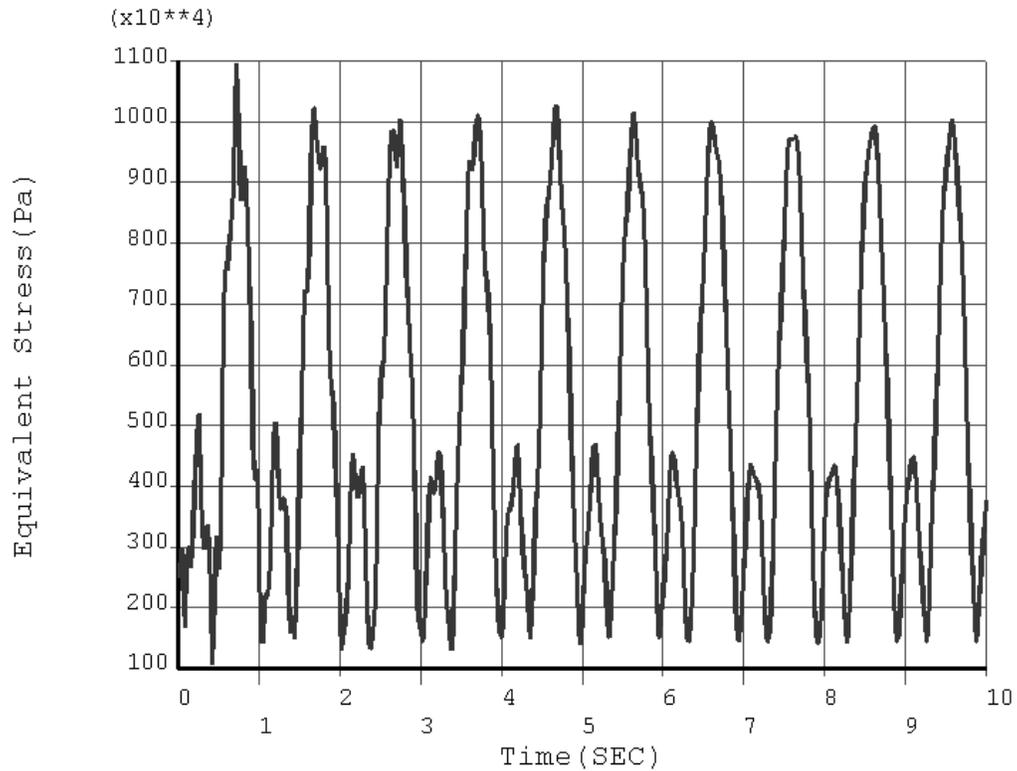
1) Contraintes dynamiques d'une pale en aluminium de profil NACA63-421:

Figure A2.1 Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 4 m/s)

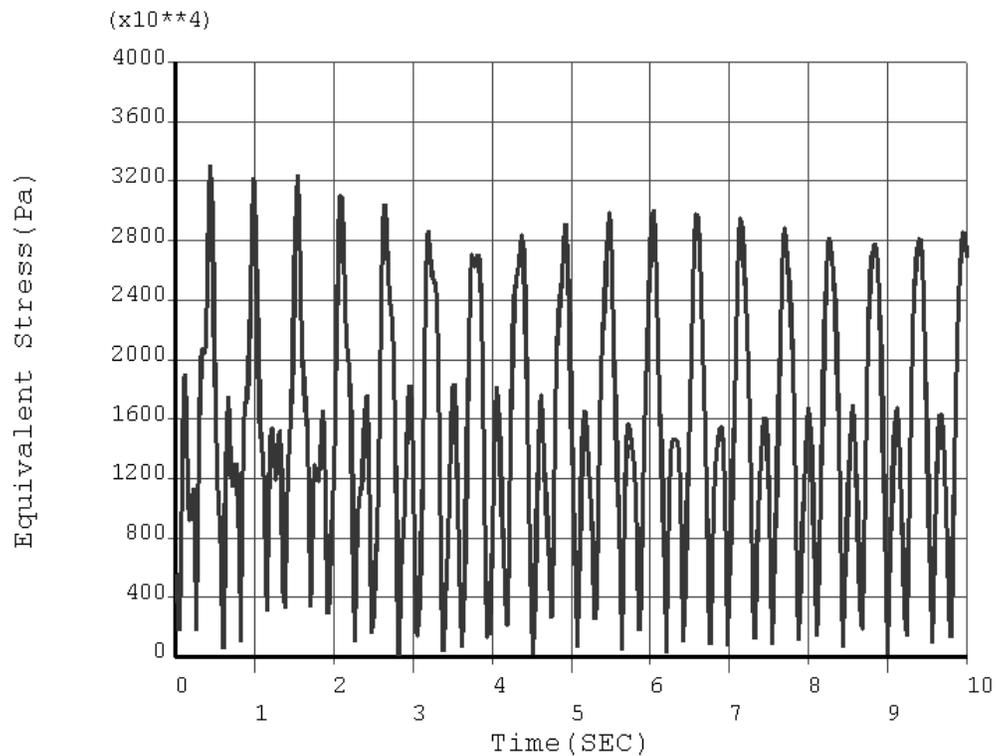


Figure A2.2. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 7 m/s)

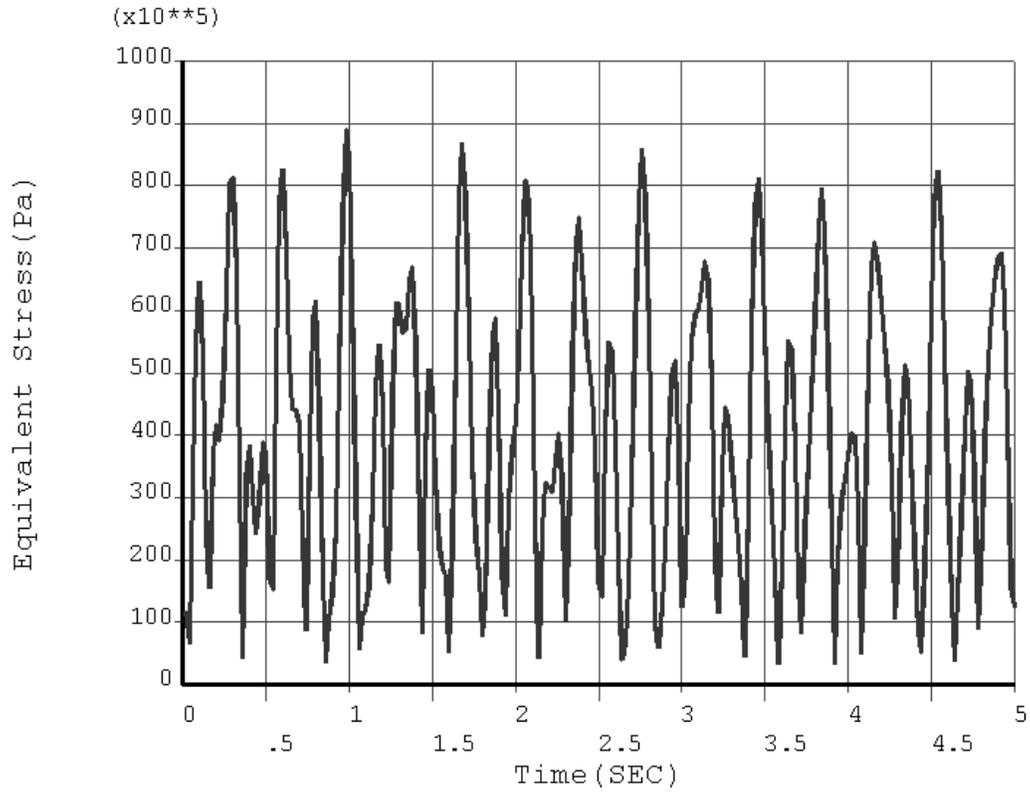


Figure A2.3. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement (vitesse du vent 11 m/s)

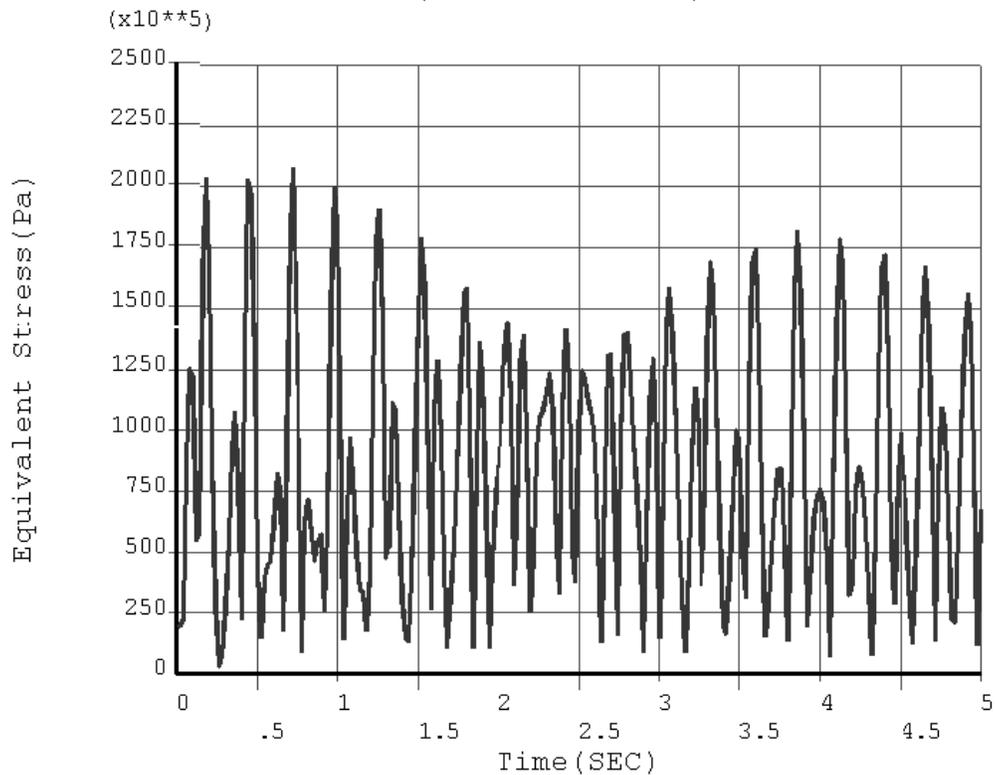


Figure A2.4. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement (vitesse du vent 15 m/s)

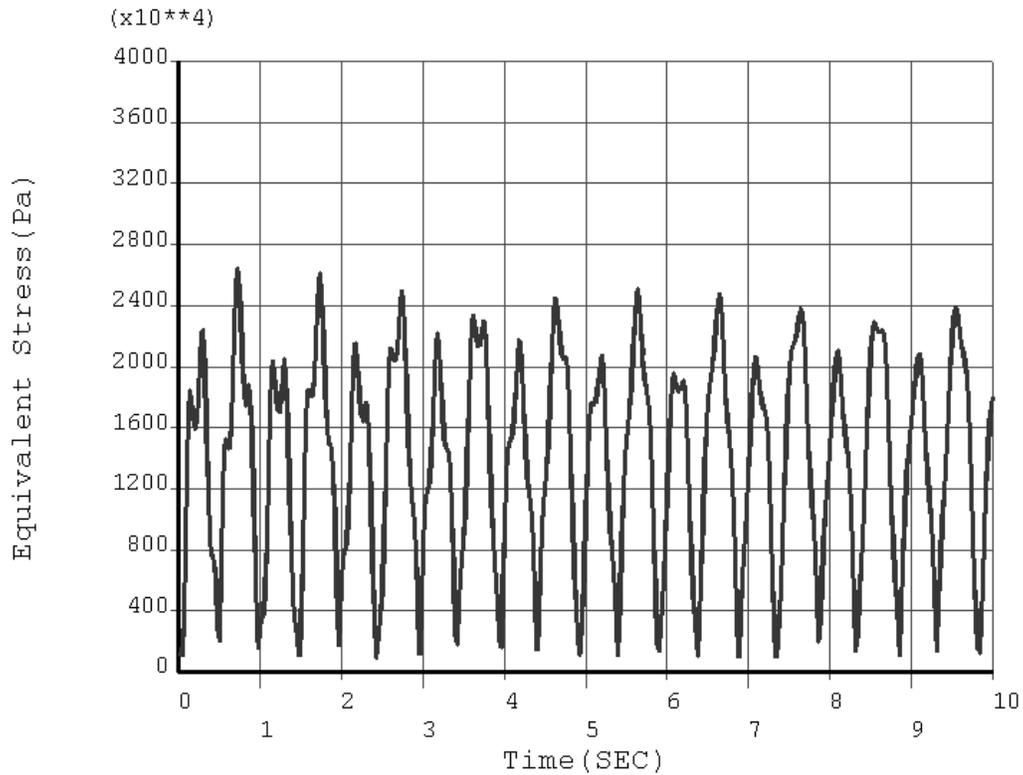
2) Contraintes dynamiques pale en matériau composite de profil NACA63-421:

Figure A2.5. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 4 m/s)

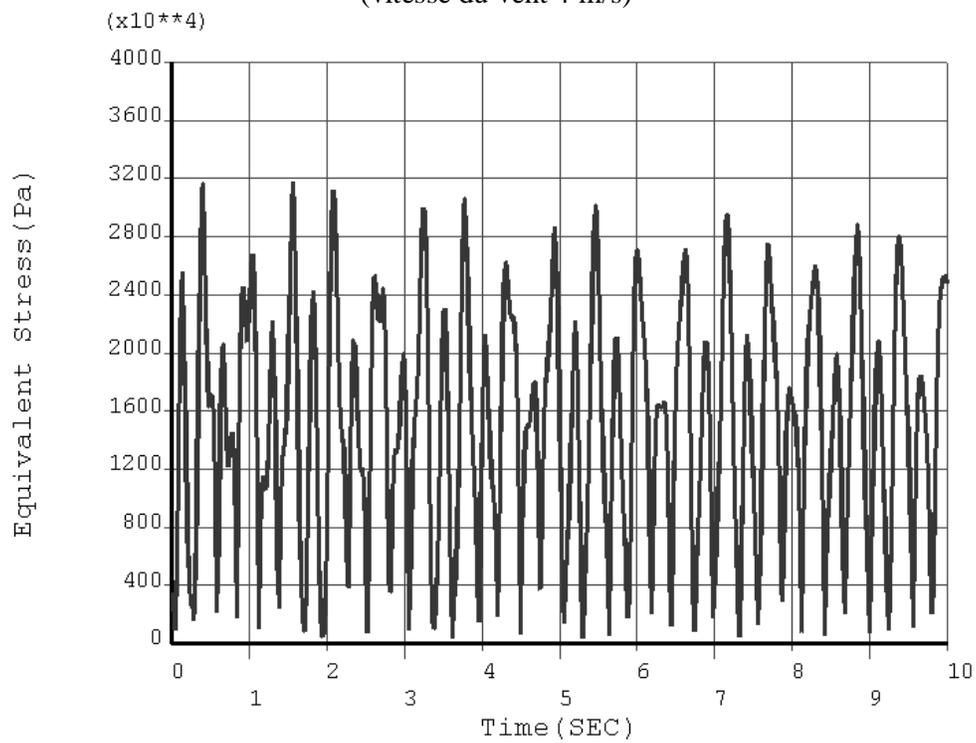


Figure A2.6. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 7 m/s)

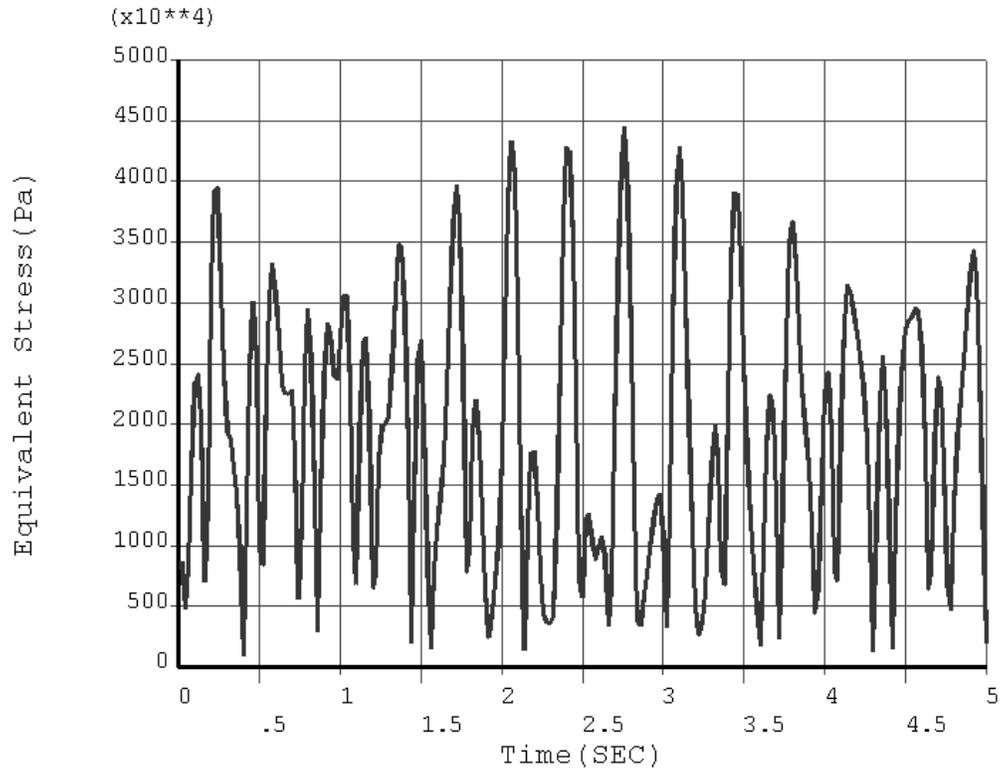


Figure A2.7. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 11 m/s)

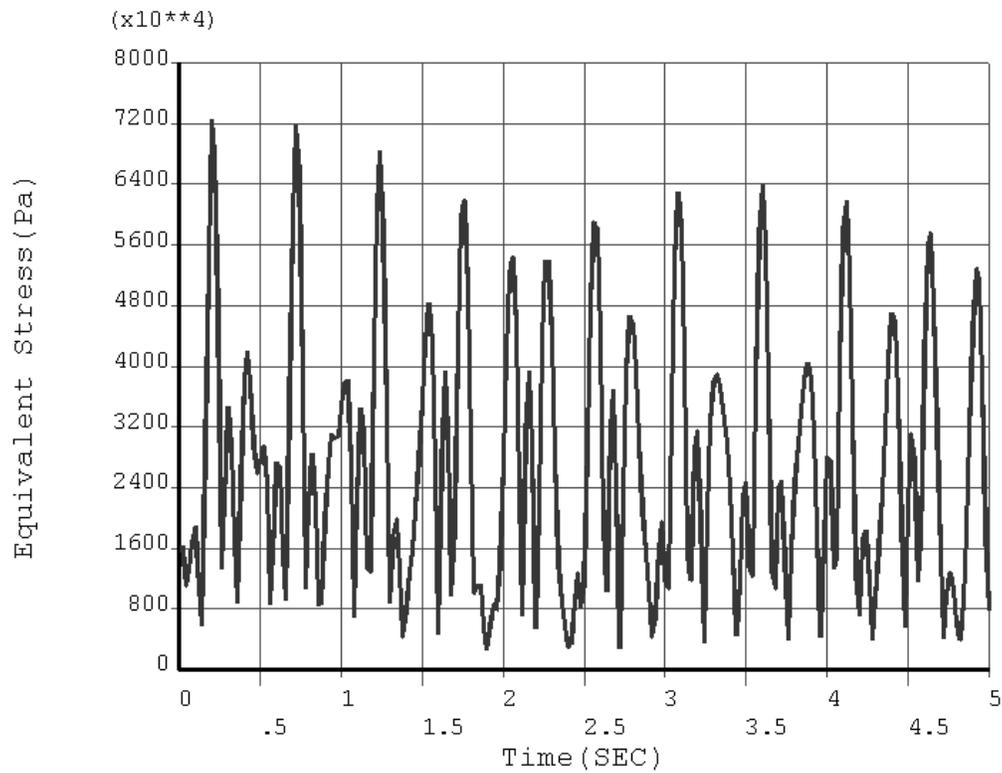


Figure A2.8. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 15 m/s)

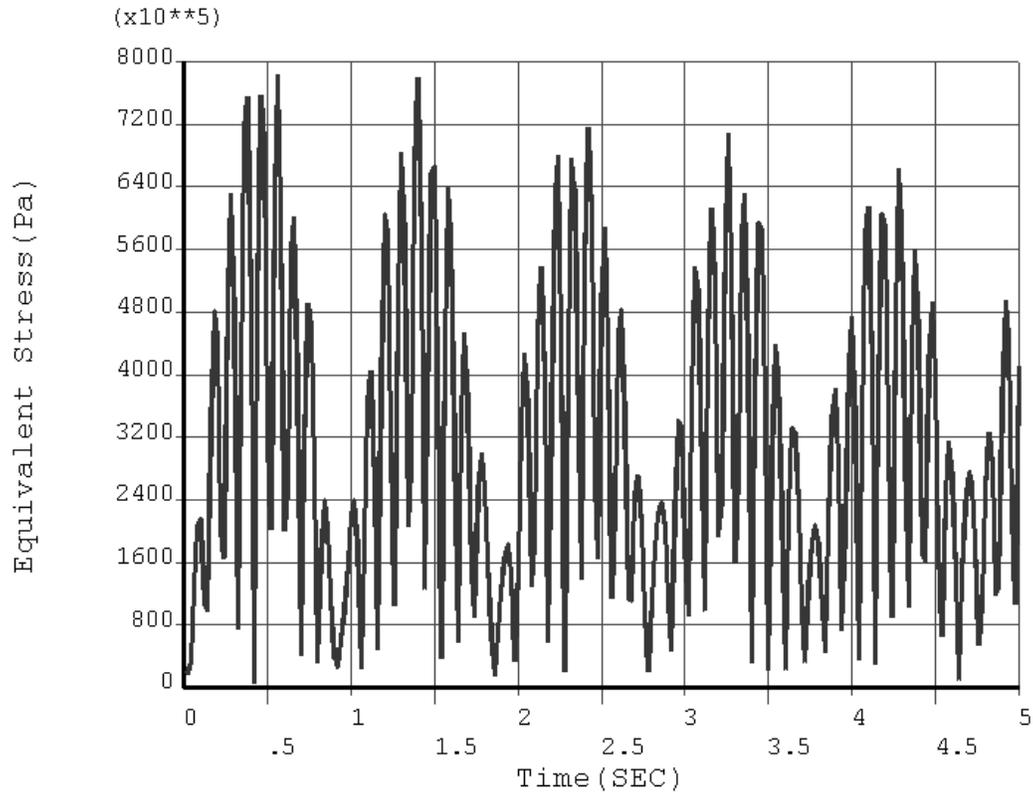


Figure A2.9. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 19 m/s)

3) Contraintes dynamiques pale en matériau composite de profil S809:

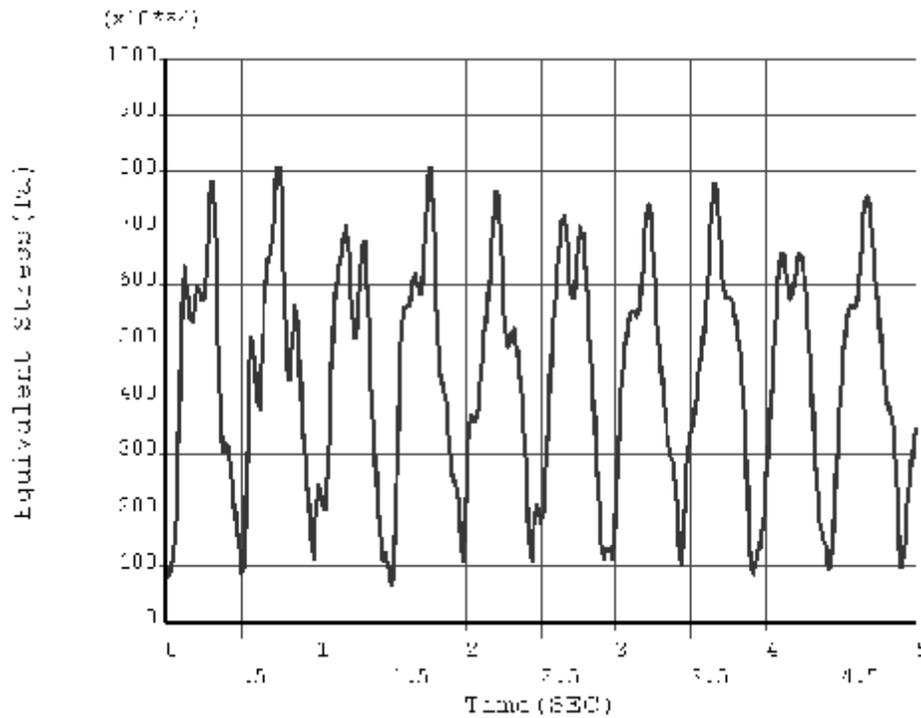


Figure A2.10. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 4 m/s)

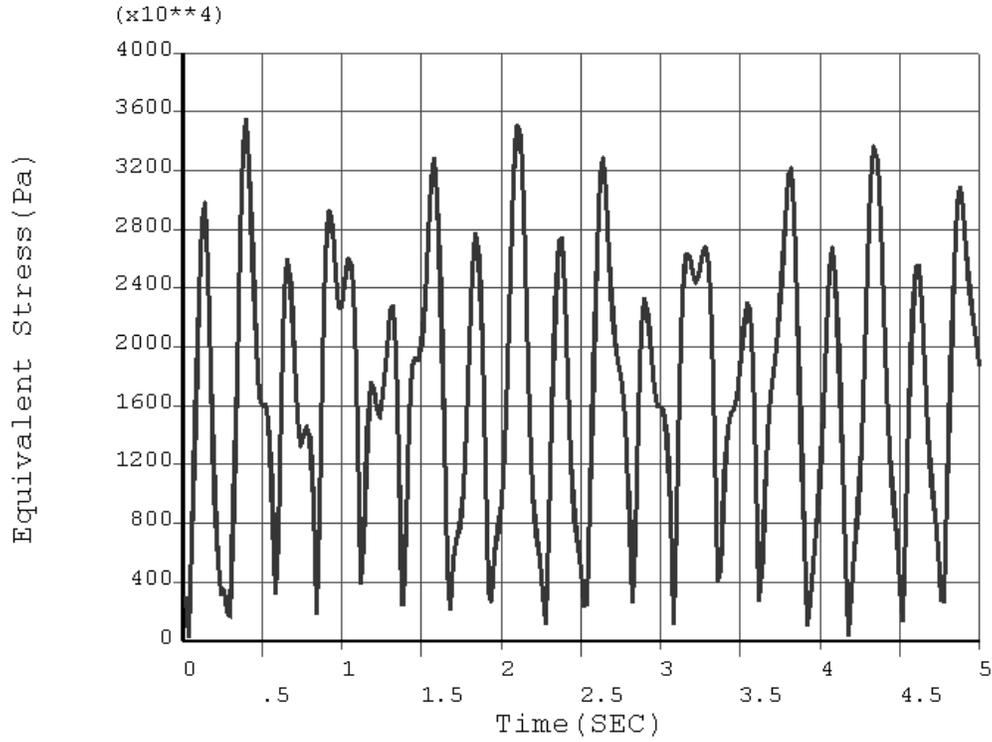


Figure A2.11. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement (vitesse du vent 7 m/s)

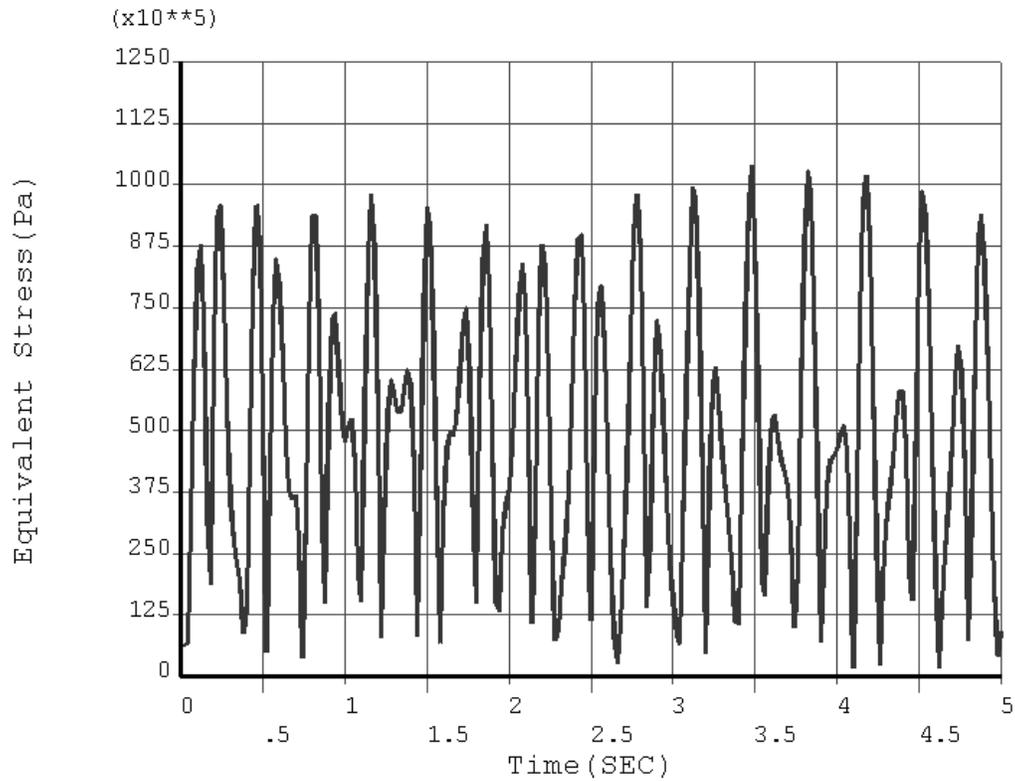


Figure A2.12. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement (vitesse du vent 11 m/s)

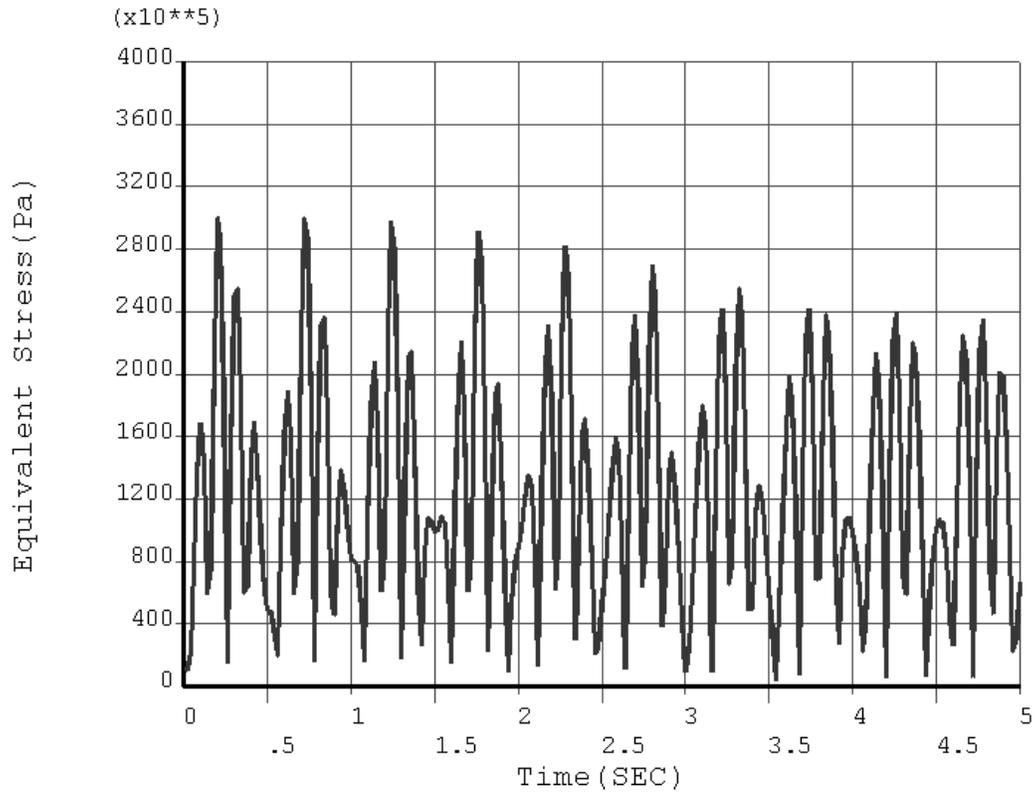


Figure A2.13. Contrainte dynamique équivalente à l'encastrement
(vitesse du vent 15 m/s)

ANNEXE III
COURBES DES DISTRIBUTIONS STATISTIQUES

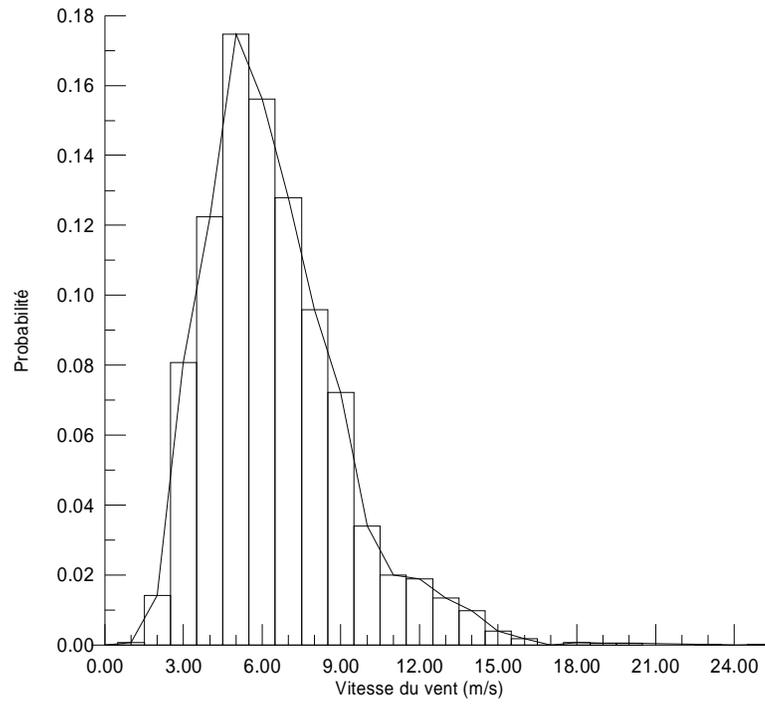


Figure A3.1 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville d'Adrar)

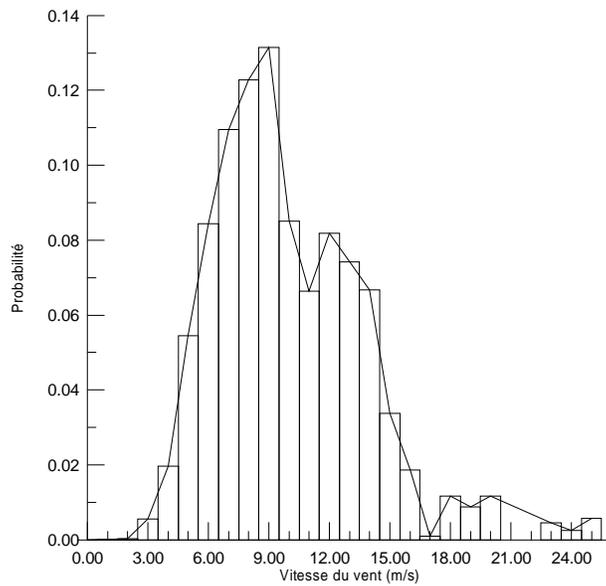


Figure A3.2 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville d'Adrar)

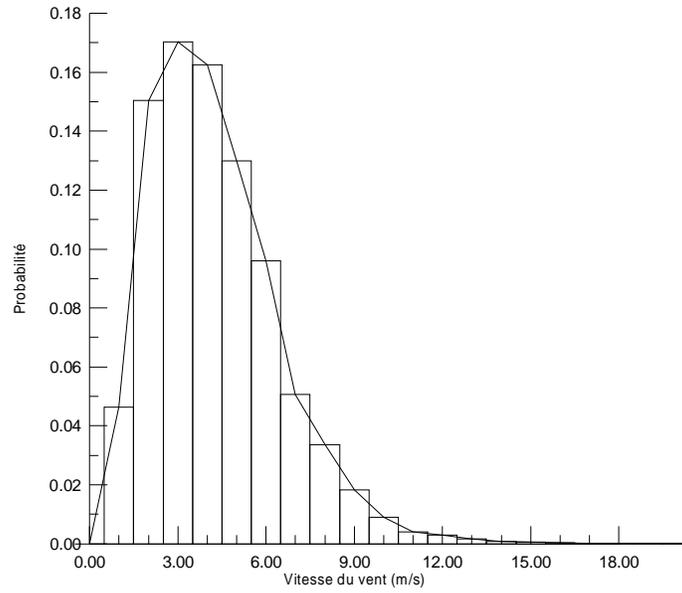


Figure A3.3 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville d'Annaba)

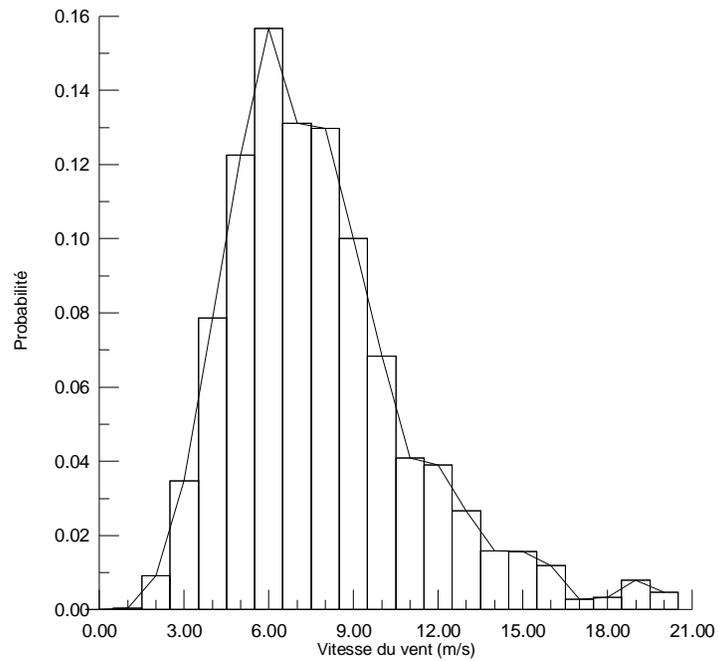


Figure A3.4 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville d'Annaba)

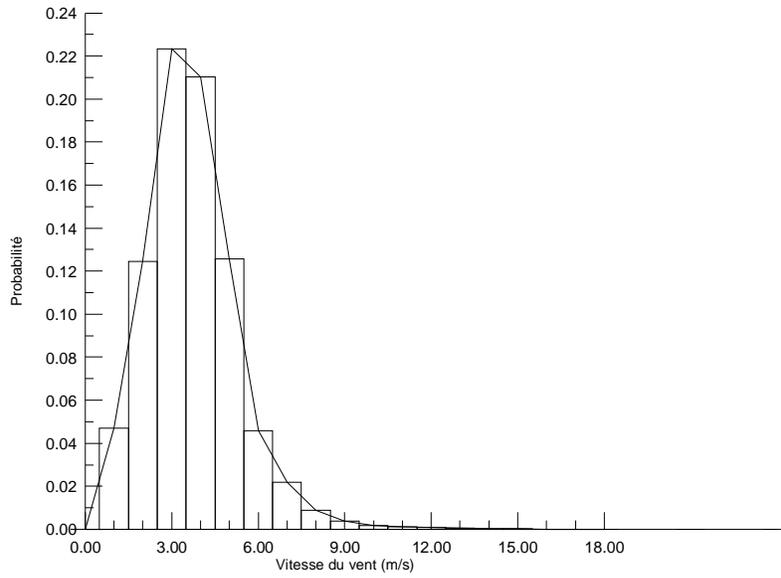


Figure A3.5 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville de Bejaia)

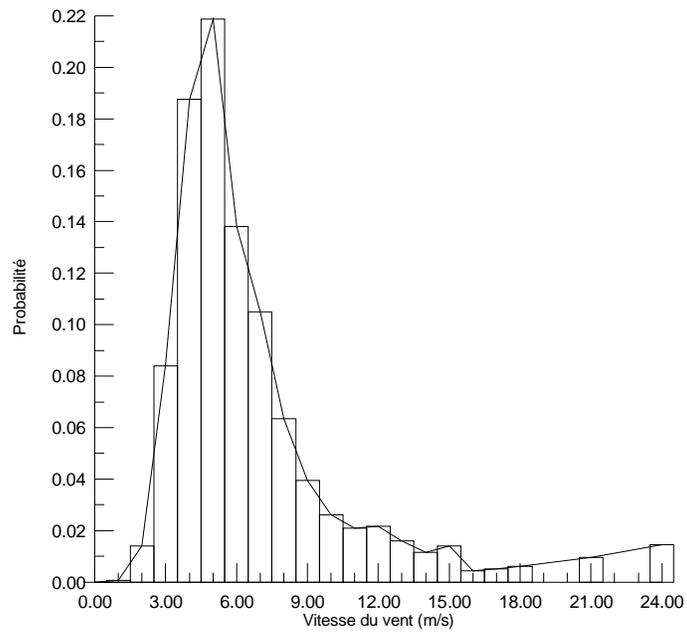


Figure A3.6 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville de Bejaia)

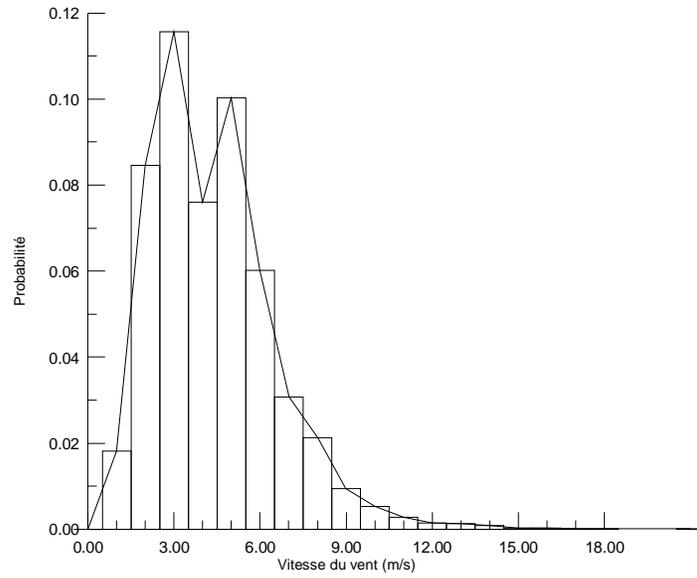


Figure A3.7 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville de Constantine)

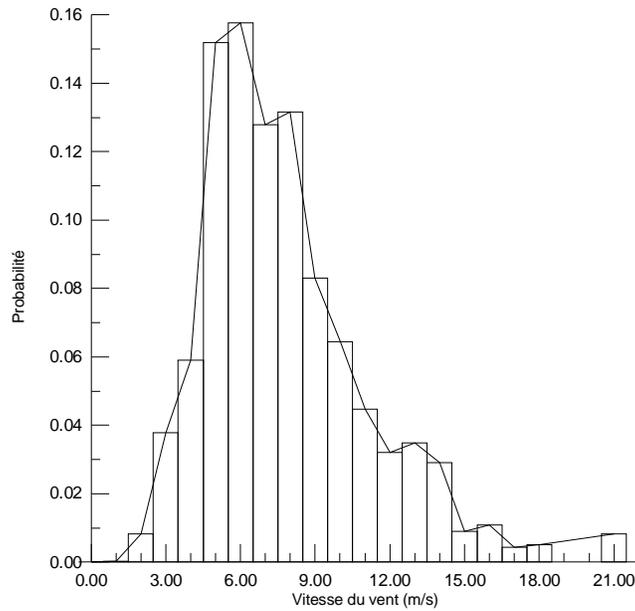


Figure A3.8 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville de Constantine)

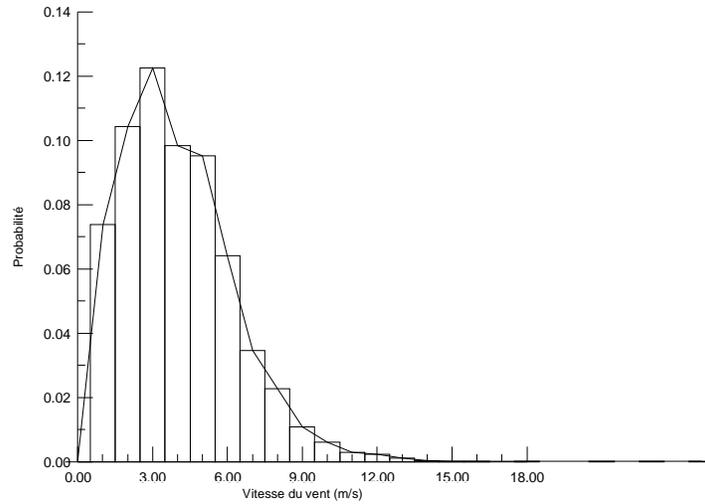


Figure A3.9 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville d'Alger, Dar El Beida)

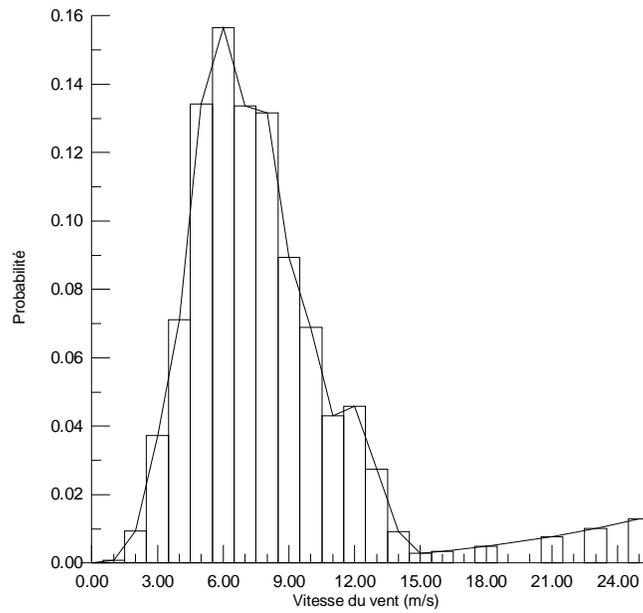


Figure A3.10 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville d'Alger, Dar El Beida)

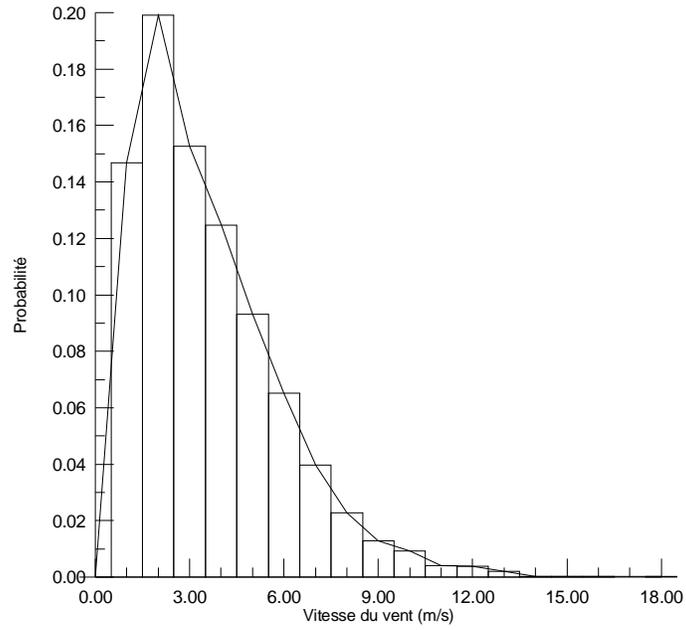


Figure A3.11 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville d'Oran)

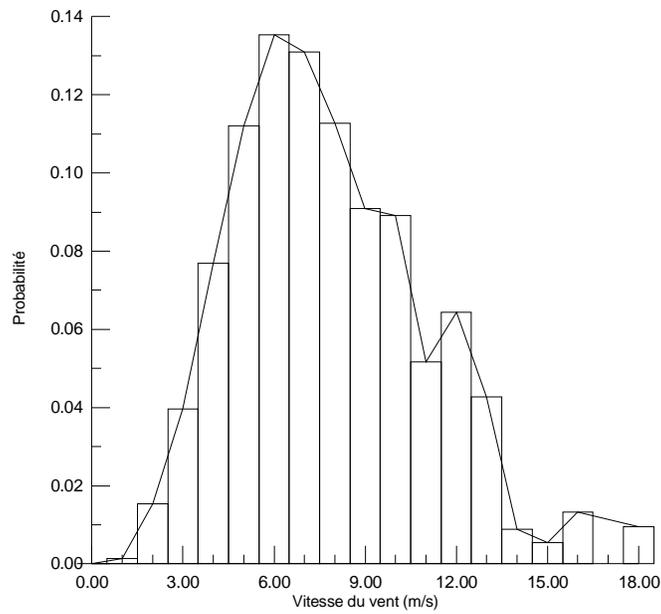


Figure A3.12 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville d'Oran)

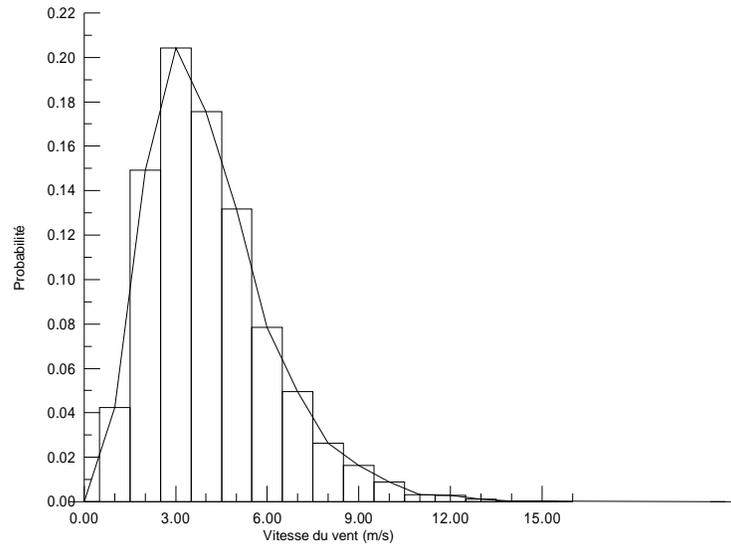


Figure A3.13 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville de Sétif)

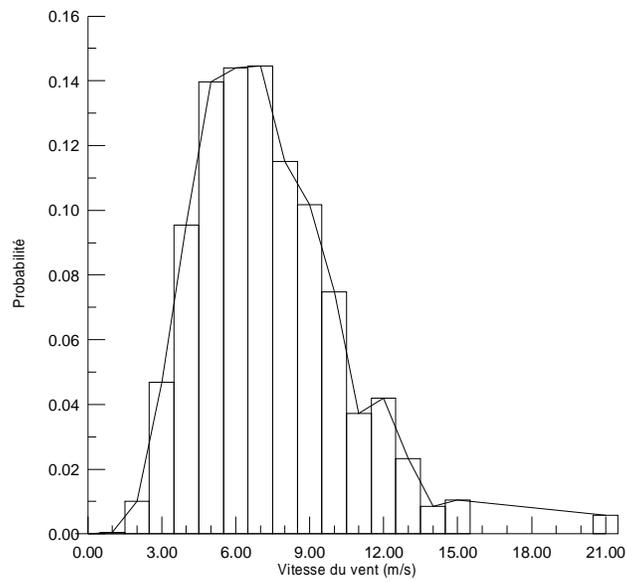


Figure A3.14 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville de Sétif)

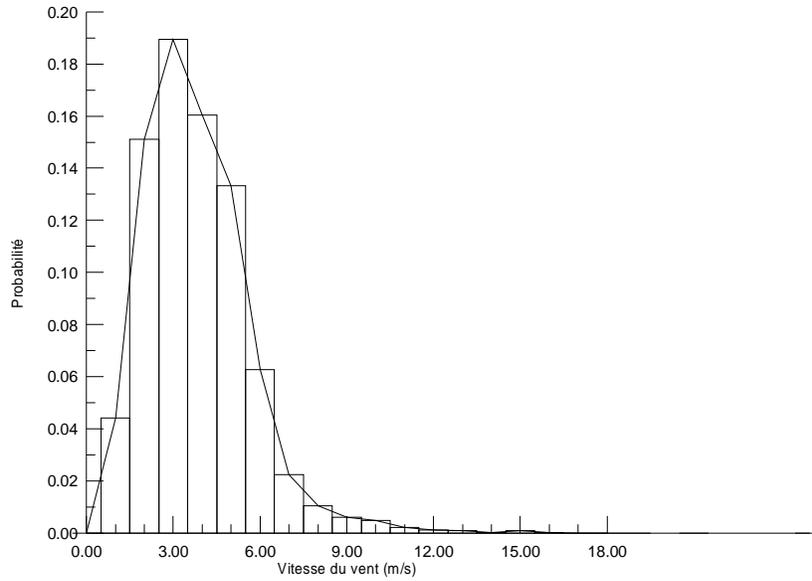


Figure A3.15 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville de Skikda)

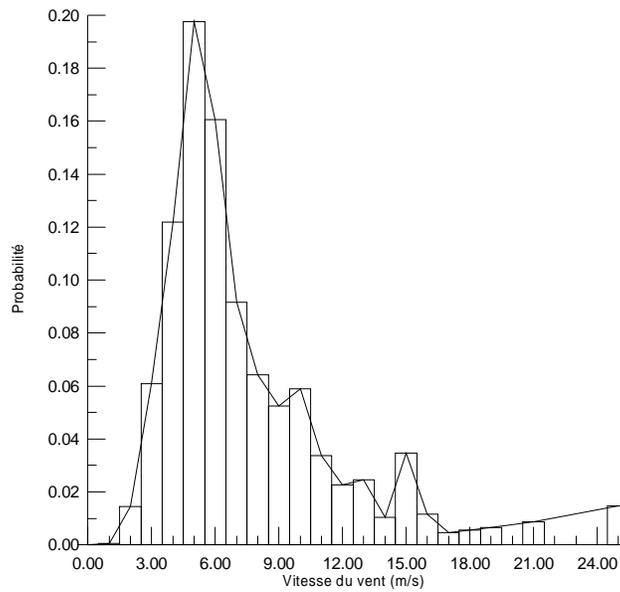


Figure A3.16 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville de Skikda)

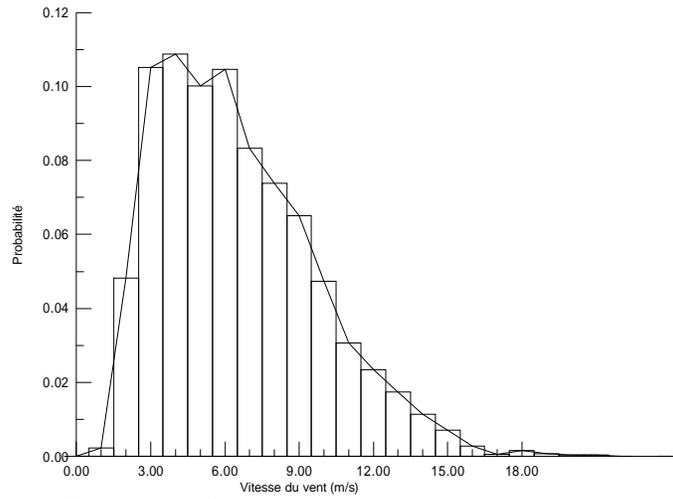


Figure A3.17 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville de Tindouf)

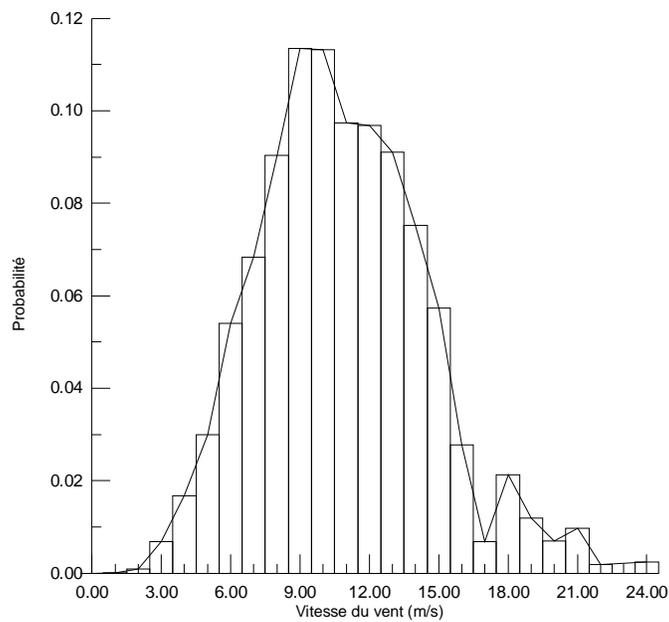


Figure A3.18 Densité de probabilité de la puissance moyenne disponible (ville de Tindouf)

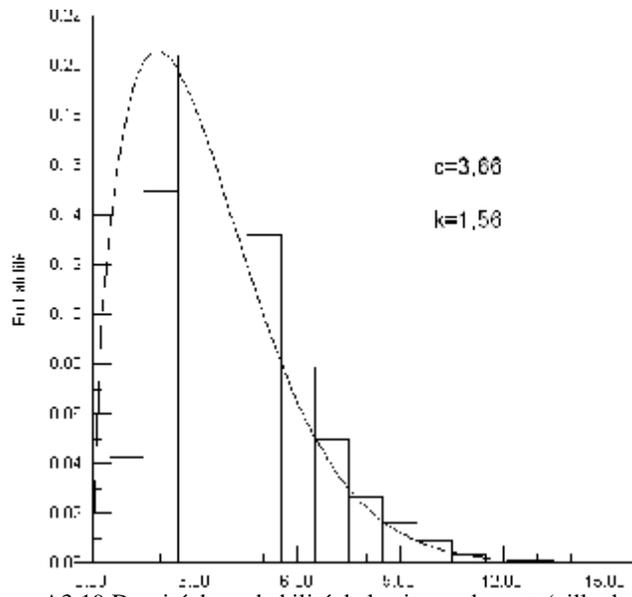


Figure A3.19 Densité de probabilité de la vitesse du vent (ville de Sétif)
 Comparaison de la distribution Weibull avec données météo

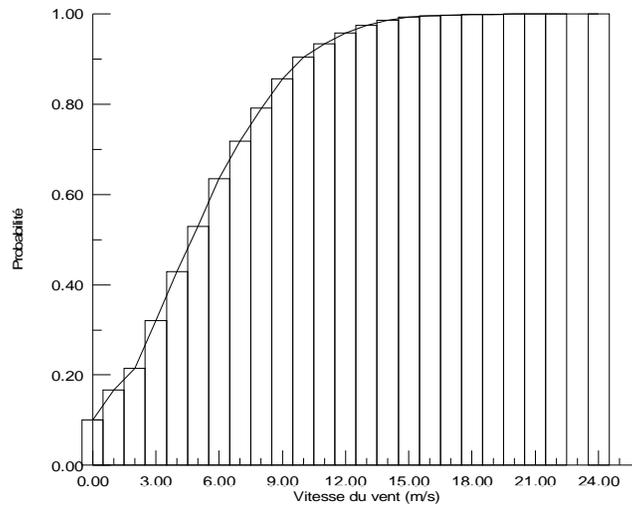


Figure A3.20 Densité de probabilité cumulée de la vitesse du vent
 (ville de Tindouf)

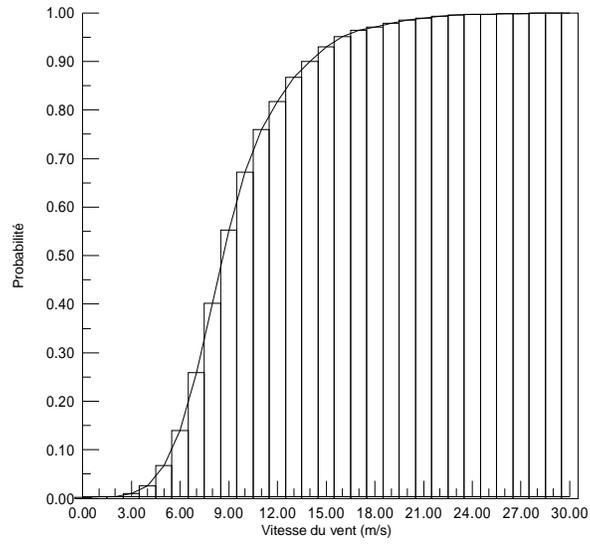


Figure A3.21 Densité de probabilité cumulée des vitesses max du vent (ville de Constantine)

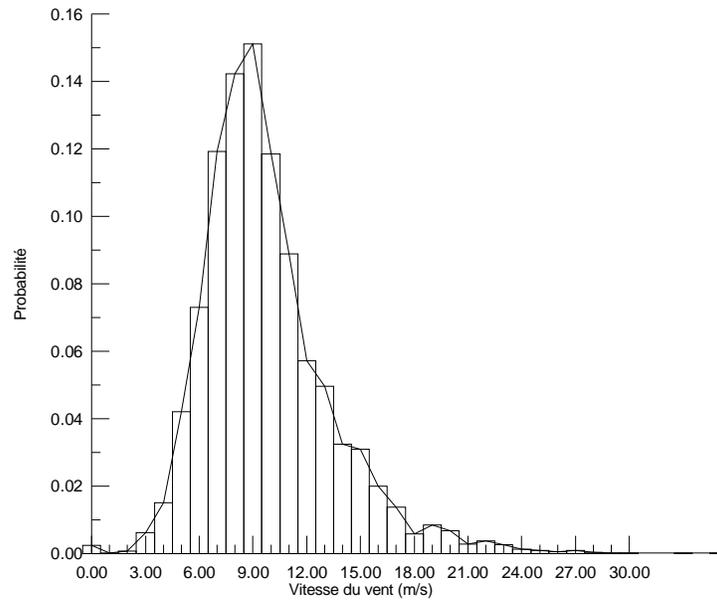


Figure A3.22 Densité de probabilité des vitesses max du vent (ville de Constantine)

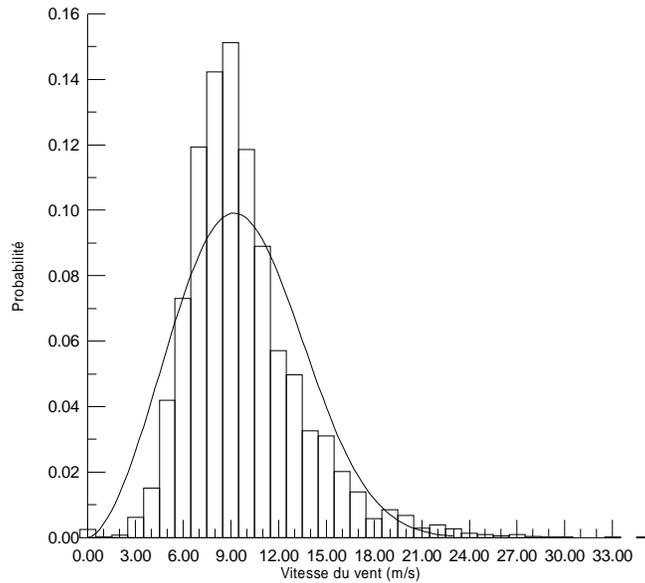
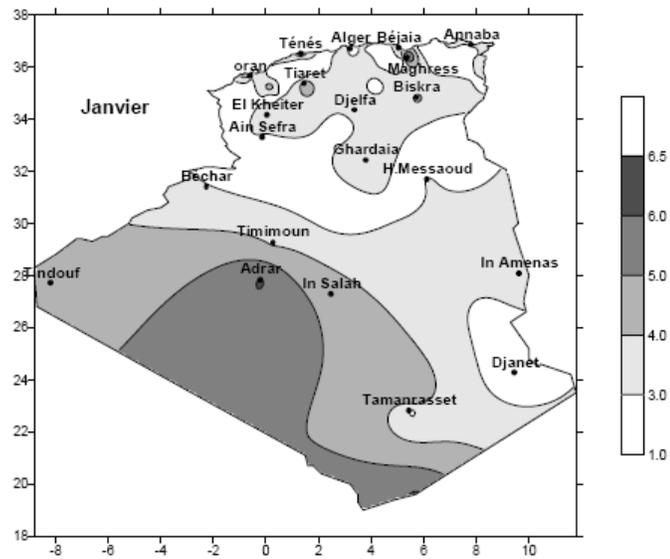


Figure A3.23 Densité de probabilité des vitesses max du vent (ville de Constantine)
 Comparaison de la distribution Weibull avec données météo



Tracé des cartes mensuelles de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s)
 Figure 24

ملخص:

إن الهدف من هذه الدراسة هو تعيين المردود الطاقوي الأمثل لمولد مروحي، وذلك بتعيين العوامل التي تمكن من توليد طاقة عظمى وتقليل المشاكل البنوية للمروحة. استهلكت هذه الدراسة بعرض للأثار البيئية والاقتصادية لاستعمال طاقة الريح. في الجزء الثاني من هذه الدراسة، تم إنجاز الحسابات الانسيابية التي تهدف لحساب القوى الانسيابية وكذلك الشكل الأمثل للريشات والطاقة المولدة. أما الجزء الثالث فخصص لحساب الأنماط والترددات لهذه الريشات. ثم استعملت النتائج السابقة لحساب الإجهادات الديناميكية. مكن تعيين هذه الإجهادات من حساب العياء باستعمال "طريقة ماينر". اختتم هذا العمل بدراسة إحصائية لسرعات الرياح تخص مناطق مختلفة من القطر الجزائري. إن استخدام النموذج السابق مكن من تعيين الشكل الأمثل لريشات المولد المروحي بهدف توليد طاقة عظمى وضمان متانة كافية تمكن من تشغيل آمن وفعال للمولد.

Abstract:

The aim of this work is the optimization of the energetic performance of a wind turbine, in order to maximize the energy extracted and minimize the structural problem. This study is introduced by a review of economical and ecological aspects of wind energy. The second part of this work is an aerodynamic modelling of the rotor aiming to calculate the aerodynamic loads, determine the optimal form of the blades and estimate the extracted power. Next, a modal analysis of the blades is done in order to compute its frequencies and mode shapes. This analysis is useful for estimation of dynamic loads. In the fourth part of this study, dynamic stresses on the blades are calculated. The fatigue of the blades is then estimated using Miner theory. In the last part, a statistical modelling is performed for several regions in Algeria. The application of this model to a variety of profiles allows determining the optimal profile in order to maximize the generated power and guarantee

Résumé:

L'étude présentée a pour objectif d'optimiser les performances énergétiques d'un aérogénérateur, afin de maximiser l'énergie éolienne captée tout en diminuant les problèmes de structure. Cette étude est introduite par une revue de l'aspect économique et écologique de l'énergie éolienne, dans le premier chapitre, mettant ainsi l'accent sur la place qu'occupe cette filière énergétique dans le monde. Ensuite, une modélisation aérodynamique de l'hélice est effectuée, dans la deuxième partie. 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. Dans la troisième partie de ce travail une analyse modale de l'hélice est effectuée. Ce calcul modal permet d'obtenir les fréquences et les modes propres des pales. En se basant sur les résultats précédents, une analyse dynamique est effectuée permettant de calculer les contraintes dynamiques qui agissent sur les pales. Puis la fatigue est estimée à l'aide de la théorie de M.A. Miner. Cette dernière partie permet de prévoir les problèmes de structure. Enfin, la dernière partie de ce travail est réservée à une modélisation statistique des vitesses du vent relative à plusieurs sites en Algérie. L'application de ce modèle pour plusieurs types de profil a permis de déterminer le profil optimal.