

M/531.6-19/07

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

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

UNITE DE RECHERCHE
MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES



MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE : PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX

Présentée par

Mohammed BEY

Thème

**MODELISATION D'UNE CHAINE
DE
CONVERSION EOLIENNE**

Application au site de Tlemcen

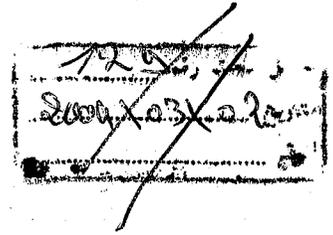
Soutenu en Janvier 2005,

devant le jury composé de :

- | | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Président | : N. CHABANE SARI | Professeur, Université de Tlemcen |
| Directeur de Thèse: | B. BENYOUCEF | Professeur, Université de Tlemcen |
| Examineurs | : T. BENOUAZ | Professeur, Université de Tlemcen |
| | S. KHALDI | Professeur, Université de Tlemcen |
| Co-directeur | : F. BENYAROU | Docteur, Université de Tlemcen |



DEDICACES



Inscrit Sous le N°:
Date le:	07 DEC 2011
Code:	5924

Avec l'aide de Dieu tout puissant j'ai pu achever ce modeste travail que je dédie à :

☞ *Mes chers parents pour soutien durant toutes mes études.*

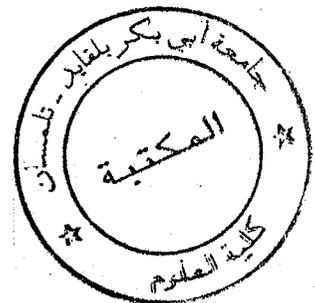
☞ *Ma très chère sœur et mes très chers frères.*

☞ *Melle B. Houda.*

☞ *Tous mes amis :*

B. Djamila, M. Raja, O. Wahiba

B. Khaled, O. Mounir, Z. Rachid, Brahim, Sid Ahmed.



REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour terminer ce travail. Les travaux qui font l'objet de ce mémoire ont été réalisés à l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université Abou-Bakr Belkaïd de TLEMCEN, sous la direction de Monsieur B. BENYOUCEF, Professeur. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour la clarté de son enseignement, les conseils judicieux et le soutien constant qu'il m'a prodigués au cours de l'élaboration de ce mémoire, ainsi que l'esprit d'initiative et de recherche qu'il a su me transmettre. Je tiens à remercier vivement M. F. BENYAROU Docteur à l'Université de TLEMCEN, avec l'expression de ma grande estime et ma reconnaissance pour ces conseils hautement pédagogiques et scientifiques qu'il n'a cessé de nous prodiguer dans le cadre de ce travail, je lui en suis très reconnaissant.

Mes remerciements les plus élogieux vont à Monsieur N. CHABANE SARI Professeur à l'Université de Tlemcen pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury de mémoire.

Je formule mes sincères remerciements à Monsieur T. BENOUAZ Professeur à l'Université de Tlemcen et S. KHALDI Professeur à l'Université de Tlemcen de nous avoir honoré par leurs présences au jury en tant qu'examineurs.

Je teins également à exprimer mes remerciements à monsieur D. Afungchui, Monsieur K. Ameer et Monsieur S. Amara pour les encouragements et l'aide qu'ils m'ont porté.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à tous les membres de l'URMER de l'Université de TLEMCEN.

ABBREVIATIONS ET SYMBOLES

- A_{ij} : Coefficient d'auto-influence.
- B_{ij} : Coefficient d'influence.
- A_s : surface de sortie
- C : Corde de la pale [m].
- C_D : Coefficient de traînée (drag coefficient).
- C_L : Coefficient de portance (Lift coefficient).
- C_m : Couple de moteur.
- C_P : Coefficient de pression.
- C_{PW} : Coefficient de puissance.
- C_x : Coefficient de poussée.
- C_z : Coefficient de portance suivant le plan de rotation.
- C_T : Coefficient de couple.
- D : Diamètre de l'hélice.
- D_m : Coefficient de frottement du côté générateur.
- D_t : Coefficient de frottement du côté turbine.
- D_{tm} : Coefficient d'amortissement.
- F_L : Force de portance.
- F_D : Force de traînée.
- F_a : Force axiale.
- F_t : Force tangentielle.
- g : Accélération de la pesanteur.
- J_m : Moment d'inertie du côté machine électrique.
- J_t : Moment d'inertie du côté turbine.
- K_{tm} : Coefficient de rigidité.
- m_{ii} : Points de collocations.
- N_P : Nombre de pales.
- p : Pression statique.
- P_e : La puissance électrique.
- P_{eg} : La puissance électrique nominale de l'aérogénérateur commercialisé.
- P_n : Puissance nominale.
- P_m : Puissance mécanique recueillie sur l'arbre lente.

- R_m : Longueur de pales .
- S : Surface balayée par l'hélice.
- T_{a-ar} : Couple capé par l'aéroturbine ramené à l'axe rapide.
- T_{em} : Couple électromagnétique de la machine électrique.
- T_{mec} : Couple mécanique dans le terrain de puissance.
- V : La vitesse d'écoulement d'un fluide.
- V_e : Vitesse du vent.
- V_r : Vitesse relative de l'air
- Z_i : Points de singularités.
- α : Angle d'incidence.
- β : Angle de calage.
- β_D : Angle de calage correspond au démarrage.
- ρ : Masse volumique de l'air $\approx 1.25 \text{ Kg/m}^3$.
- ρ_1 : Masse volumique de pales.
- ψ : Fonction de courant.
- σ : Débit d'une source.
- Φ : Potentiel des vitesses.
- φ : Flux.
- φ_{pi} : L'angle de rotation de la pale pi .
- λ : Vitesse spécifique.
- ω : Vitesse complexe.
- Ω : Vitesse de rotation de l'hélice.
- Ω_m : Vitesse de rotation du générateur.
- Ω_{t-ar} : Vitesse de rotation de la turbine ramené à l'axe rapide.
- Σ : Surface de la pale.
- Γ : Couple turbine.
- μ : Viscosité dynamique.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I

Généralités

Introduction.....	04
I-1 Le vent	04
I-1.1 La force de Coriolis	05
I-1.2 Le gradient de la vitesse du vent.....	06
I-1.3 Les brises.....	07
I-2 Différents types de capteurs éoliens dynamiques	10
I-2.1 Les capteurs à axe horizontal.....	11
I-2.2 Les capteurs à axe vertical	12
I-3 Principes de base des aérogénérateurs (à axe horizontal)	13
I-3.1 Les composantes d'un aérogénérateur	13
I-3.2 Principe de fonctionnement	15
I-3.3 Coefficient de puissance et de couple.....	18
I-3.4 Système de régulation	20
I-3.5 Générateurs électriques	24
I-3.6 Structure des systèmes de conversion	26
I-4 Conclusion	28

CHAPITRE II

La distribution de pression sur un capteur éolien

II-1 Introduction.....	29
II-2 Position du problème	30
II-3 La distribution de pression autour du profil.....	32
II-3.1 La fonction de Green-Riemann	32
II-3.2 Résolution du problème	33
II.3.3 Le coefficient de portance	43

II-5 Conclusion	45
-----------------------	----

CHAPITRE III

Modèle de simulation

Introduction.....	46
III-1 Moment d'inertie de l'hélice	46
III-2 Représentation simplifiée	51
III-2.1 Théorie du disque actuateur	51
III-3 Couplage mécanique	54
III-4 Vent incident sur la turbine éolienne.....	56
III-4.1 Effet d'ombre de tour de cisaillement du vent	56
III-4.2 Couple capté par la turbine	58
III-4.3 Eléments non considérés	58
III-5 Modélisation du capteur.....	59
III-5.1 Profil	59
III-5.2 Distribution de pression	63
III-5.3 Résultats	66
III-6 Conclusion	69

CHAPITRE IV

Analyse et dimensionnement

Introduction	70
IV-1 Programme d'analyse des éoliennes PAE (URMER)	70
IV-2 Caractéristiques de l'hélice	72
IV-2.1 type de profil	72
IV-2.2 Dimension et nombre de pales.....	75
IV-3 Application au site de Tlemcen (Zénata)	80
IV-4 Etude comparative.....	84
IV-5 Conclusion.....	85
CONCLUSION GENERALE	86
BIBLIOGRAPHIE.....	88
ANNEXE	90

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie éolienne est l'une des premières énergies qui a été exploitée par l'homme depuis l'antiquité (bateau à voile, moulin à vent...)

L'essor modéré de l'utilisation rationnelle de l'énergie et le recours aux sources d'énergies renouvelables fut déclenché principalement par les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 et entretenu par une conscience écologique croissante.

La place des énergies renouvelables dans la structure de l'approvisionnement énergétique de notre société s'explique surtout par un caractère aléatoire, un degré de développement technique moyen et un coût élevé de production / conversion.

L'énergie éolienne résulte de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, ou à un aérogénérateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Lorsque l'arbre est connecté à une charge (exemple : une pompe) la machine est appelée roue éolienne. Lorsque l'énergie éolienne est utilisée pour produire de l'électricité, il s'agit d'une turbine éolienne ou d'un aérogénérateur.

L'énergie éolienne est une énergie inépuisable et non polluante. Elle ne nécessite que la présence du vent dans le site d'implantation. D'après certaines recherches, on estime que le vent distribue entre 2.5 et 5.10^{15} kWh chaque année, soit une énergie très importante éparpillée et difficilement récupérable.

La conversion des énergies constitue la base de l'énergétique. La conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique nécessite des mécanismes (engrenages, courroies, chaînes), et celle de l'énergie mécanique en énergie électrique utilise un générateur de courant électrique. L'énergie mécanique et l'énergie électrique étant des énergies nobles par excellence, et on peut passer de l'une à l'autre avec des rendements élevés.

Toute utilisation d'énergie renouvelable demande une quantification par cartes énergétiques. L'établissement de ces cartes permet la classification des régions suivant les types d'énergies renouvelables existantes, leurs importances et les besoins existants sur le site considéré [26]. Par ailleurs, tout concepteur (ou utilisateur), doit utiliser ces cartes énergétiques pour son dimensionnement de système.

Dans la quasi totalité des régions d'Algérie, la carte des vents montre des régions de classe 1 ($V < 3m/s$) [26]. Cette vitesse faible représente la vitesse moyenne annuelle des vents dans cette région autrement dit: Elle représente le potentiel éolien disponible. Est-il alors intéressant d'exploiter l'énergie éolienne de notre pays ?

Malheureusement la majorité des éoliennes actuellement commercialisées ne peuvent être bien adaptées qu'à des sites bien précis. Afin de remédier à cette situation, la tâche qui nous a été confiée, consiste à faire une analyse fine des aérogénérateurs pour une bonne adaptation à n'importe quel site.

L'intérêt de notre travail porte sur la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne et son adaptation. Ce travail est axé sur la recherche d'une forme d'hélice qui convertie le maximum d'énergie éolienne et subit le minimum de forces d'entraînement sur un site.

Pour cela

En premier lieu, et pour faciliter l'accès au lecteur, nous allons donner des généralités sur la conversion éolienne, puis nous ferons la présentation des différents types de capteurs éoliens.

Nous présenterons ensuite une modélisation et une analyse fine d'une éolienne adaptée au site de Zénata.

Nous avons consacré une grande partie de notre travail sur la modélisation et l'analyse des éoliennes. Nous avons mis au point un Programme d'Analyse de profil de pales des Eoliennes **PAE(URMER)**. Ce programme détermine la puissance de l'hélice, le coefficient de portance de n'importe quel profil de pales. Il détermine aussi la puissance mécanique captée par la turbine et permet le choix de l'éolienne adaptée à un site bien défini.

CHAPITRE I
GENERALITES

GENERALITES

Dans ce chapitre, Nous présentons la conversion d'énergie éolienne puis nous introduisons les différents types de capteurs et enfin nous introduisons les principes de base des aérogénérateurs.

La prédiction des sites qui se caractérisent par des potentiels de vents importants, nous obligeons d'aborder le domaine d'aérologie. Ce dernier concerne l'étude des particules d'air dans des terrains de quelques centaines à quelques milliers de mètres de diamètre : étude des ascendances sous nuages, effet du vent sur le relief, les brises, etc.

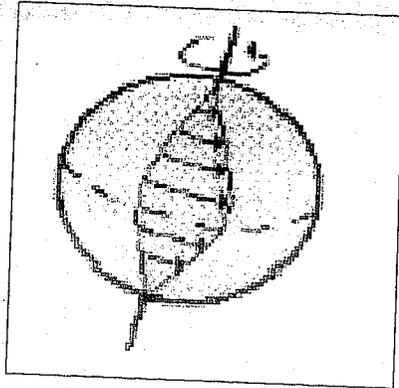
I.1 LE VENT

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les différences de températures. Les variations dans la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire reçue à la surface de la Terre, et aux différences dans les propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures des régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'élever et à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la Terre.

I.1.1. La force de Coriolis

La force de Coriolis est une loi de la cinématique, dont l'énoncé est relativement simple : Toute particule en mouvement dans l'hémisphère nord est déviée vers sa droite (vers sa gauche, dans l'hémisphère sud). Son action est prépondérante dans l'étude des vents [1].

La Terre tourne autour d'un axe nord-sud. Etant donnée la forme sphérique du globe terrestre, la vitesse linéaire d'un point de sa surface n'est pas constante et dépend de la latitude de ce point : elle augmente en partant d'un pôle, passe par un maximum à l'équateur, puis décroît jusqu'à l'autre pôle.



En fait, la force résultante (Force de Coriolis) est négligeable dans la plupart des cas, mais devient très importante dans certains phénomènes, dont fait partie le déplacement des masses d'air : Faible masse des particules, grande échelle de mouvement.

De plus, on le comprend aisément en se référant à la figure ci-dessus, plus le déplacement est rapide, plus la déviation de Coriolis engendrée est importante.

Enfin, pour qu'il y ait une force de Coriolis il faut qu'il y ait changement de vitesse du support lors du déplacement sur celui-ci. Donc, la force de Coriolis est maximale aux pôles et négligeable à l'équateur [1].

1.1.2 Le gradient de la vitesse du vent

Un gradient, au sens physique du terme, est un taux de variation en fonction de la distance. Le gradient de la vitesse du vent (à l'approche du sol) est donc le taux de variation de vitesse entre l'altitude où il ne subit plus de variation due à la proximité du sol et l'altitude 0 mètre. Le terme peut bien entendu également être utilisé pour décrire la variation du vent dans une couche de cisaillement, donc sans faire intervenir la surface terrestre.

En se rapprochant du sol, la vitesse du vent va logiquement diminuer. Observant l'herbe un jour de vent fort : les brins d'une hauteur inférieur à 10cm ne bougent pratiquement pas (Fig.I.1).

C'est ce qu'on appelle le phénomène de couche limite : l'air emprisonné autour des brins d'herbe ne communique plus avec la couche supérieure et subit un cisaillement permanent avec celle-ci. En extension à ce phénomène de couche limite, plusieurs autres couches coexistent de la même manière à mesurer que l'on s'éloigne du sol, jusqu'à l'arrivée à l'altitude où l'on ressentira le vent réel (d'origine météo ou autre). Ces couches se situent jusqu'à plusieurs dizaines de mètres du sol :

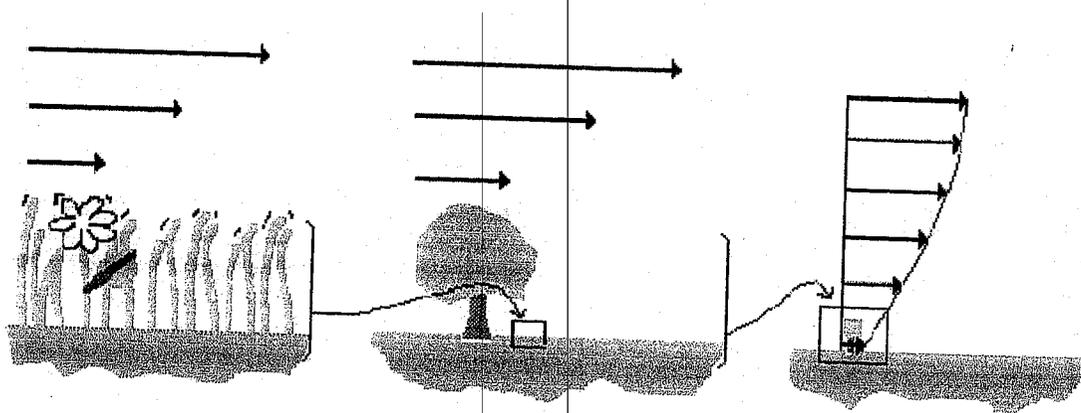


Fig.I.1: Le gradient de la vitesse du vent

La cause essentielle du gradient vient du fait que l'air possède une viscosité dynamique, c'est-à-dire une tendance à "coller" lorsqu'il est en mouvement sur une surface. Une cause secondaire provient de l'énergie cinétique perdue dans le contournement des obstacles de petite dimension. Chacune de ces deux causes se partage la responsabilité du gradient du vent ; la première à ras du sol, la seconde plus haut.

I.1.3. Les brises

Dans le langage courant, on confond généralement vent et brise. Pour le météorologue, il s'agit pourtant de circulations d'air tout à fait différentes :

- Le vent se situe à l'échelle météorologique, il a pour moteur les anticyclones et les dépressions.
- La brise est un phénomène local, d'origine convective.

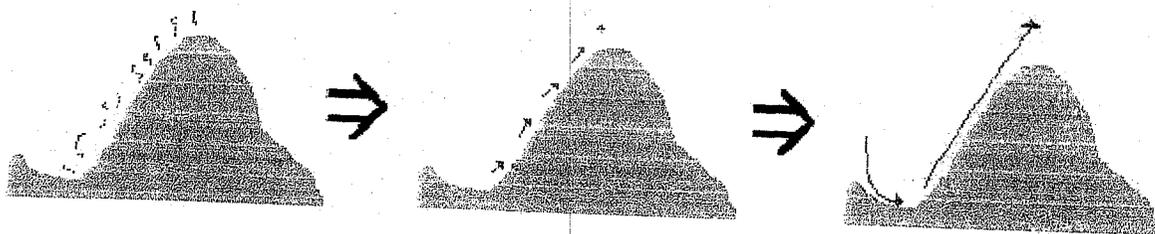
Le fonctionnement des différentes brises : brise de pente, brise de vallée et brise de mer sont décrit par [1] :

a) La brise de pente

Lorsque le soleil, chauffe le sol des versants qui lui sont exposés. Ce sol va à son tour réchauffer la couche d'air qui est en contact avec lui. Cette couche d'air va se dilater, donc peser moins lourd pour un même volume que l'air environnant et va donc avoir tendance à monter.

Si une petite surface, donc un faible volume d'air, est réchauffée fortement, nous obtiendrons un transfert thermique par convection. Cependant, le cas le plus courant correspond souvent à une grande surface de pente exposée à un rayonnement moyen. L'air, à ce moment-là, n'aura pas une concentration d'énergie suffisante pour se détacher du sol et monter dans l'atmosphère à la verticale. Il aura tendance à "coller" sur la pente par effet de viscosité statique.

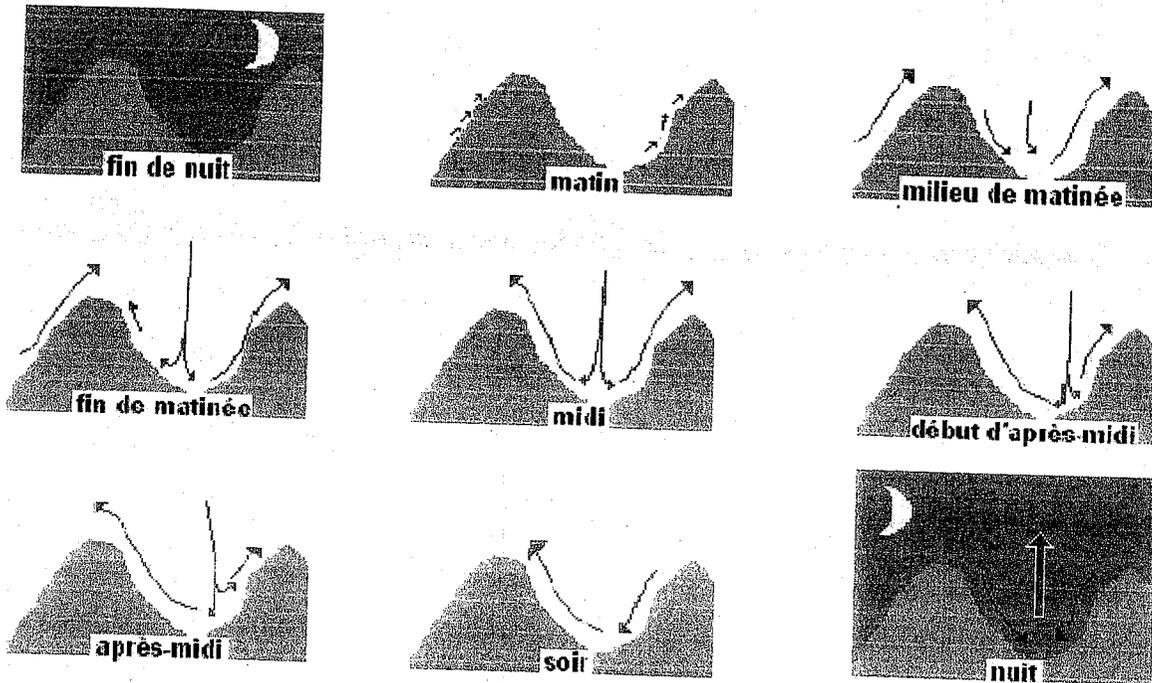
Si tout un versant est ainsi exposé au soleil, à chaque endroit de la pente les particules d'air vont "couler" en remontant jusqu'à la crête, d'où elles devront effectivement se détacher du sol pour poursuivre leur ascension. A leur place initiale, elles seront remplacées par un appel d'air depuis le bas de la pente :



La brise de pente naît, et va se développer tant que l'ensoleillement de face va durer. Si le soleil "tourne" pour éclairer d'autres versants, une brise va naître sur ceux-ci alors qu'elle va s'éteindre sur le versant abandonné, puis s'inverser pour alimenter les versants mieux exposés. La brise de pente va donc suivre la rotation du soleil : le matin, elle sera présente sur les faces

exposées à l'Est, à midi sur les faces sud et le soir sur les faces ouest, et même sur les faces nord-ouest et nord-est si l'on est proche du solstice Eté.

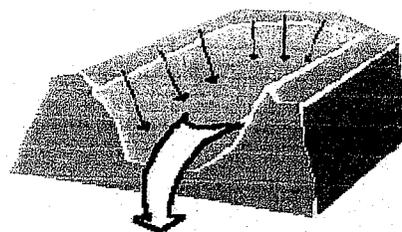
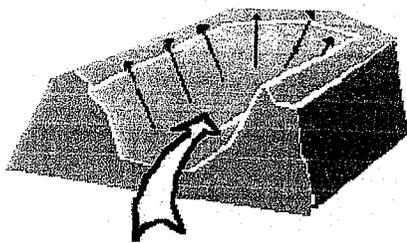
A midi solaire, lorsque toutes les pentes exposées sont éclairées, c'est le milieu de vallée qui assure l'alimentation en air frais. On a donc la situation suivante : brises montantes sur les versants et milieu de vallée en descendance. Le soir, le fond de vallée se refroidit par contre moins vite que les crêtes : on se trouve dans la situation inverse, donc c'est une brise descendante qui s'installe sur les pentes pour alimenter le milieu de vallée ascendant.



b) La brise de vallée

Présente dans les vallées suffisamment longues, elle résulte de l'appel d'air des brises des pentes présentes tout le long de la vallée, qui ne peut plus être assuré par le seul milieu de vallée si celle-ci est étroite.

L'appel d'air se communique donc de proche en proche jusqu'à l'embouchure de la vallée. Elle remonte la vallée le jour, pour en redescendre la nuit en suivant le sens des brises de pente :

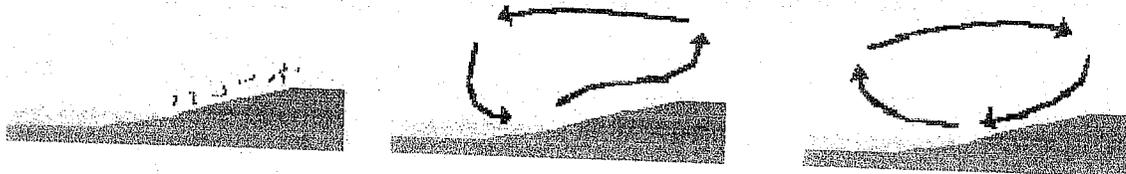


Comme elle résulte de l'accumulation des brises de pente, elle sera maximale lorsque les deux versants de la vallée seront ensoleillés, donc à midi solaire.

c) La brise de mer ou de lac

De façon analogue à la brise de pente, en raison des contrastes de températures entre surfaces importantes, se déclenche une brise de mer ou de lac s'il y a des surfaces d'eau suffisantes.

De jour, en été, la terre se réchauffe beaucoup plus rapidement que l'eau. Un phénomène d'ascendance généralisé s'établit sur la terre, compensé par un appel d'air maritime. La nuit, la terre se refroidit beaucoup plus rapidement car elle rayonne beaucoup plus que la mer qui reste chaude longtemps. Là encore, le phénomène s'inverse la nuit : On l'appelle alors la brise de terre.



En hiver, en raison du faible réchauffement des terres en cours de journée, ce sont les brises de terre qui prédominent.

En ce qui concerne les brises de lac, une grande surface est nécessaire pour déclencher le phénomène.

Conclusion :

- La brise de pente est maximale en début d'été, à midi, sur un versant orienté sud. Elle sera alors souvent trop forte (supérieure à 30km/h).
- La brise de vallée est maximale lorsque les deux versants sont bien ensoleillés, cela dépend donc de l'orientation générale de la vallée, mais amène aussi un horaire de brise très régulier pour chaque saison.
- Le fait d'avoir une brise de pente faible n'exclut absolument pas la possibilité d'une brise de vallée forte.

I.2 Différents types de capteurs éoliens

Tout d'abord, il faut noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique de rotation, seulement il est important de se poser certaines questions essentielles telles que:

- Quelle sera sa taille ?
- Son coût ?
- La puissance qu'il pourra fournir ?
- Sa résistance à l'usure?

Autant de questions qui font qu'un grand nombre de capteurs éoliens ont été mis de côté et que seul un petit nombre d'entre eux ont été largement exploités.

Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître les groupes, les noms et les formes de ces capteurs. On distingue trois principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité [2] :

▪ Le premier paramètre de fonctionnement est relatif à la vitesse périphérique (ou vitesse en bout de pale) $U = \Omega R$ (avec Ω la vitesse de rotation de la machine éolienne et R le rayon d'extrémité de la pale). Ce paramètre de rapidité ou vitesse spécifique notée λ est le rapport de la vitesse U à la vitesse V_e du vent:

$$\lambda = U / V_e = (\Omega R) / V_e \quad (\text{I-1})$$

Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre:

- i. Si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite *lente*.
- ii. Au-delà, l'éolienne est dite *rapide*.

A titre d'exemple, des éoliennes bipales peuvent avoir un paramètre λ égal à 20. Cependant, une grande vitesse de rotation peut entraîner des nuisances telles que le bruit.

Le second paramètre qui caractérise le capteur éolien est le *coefficient de puissance* noté C_{pw} . Il est défini par le rapport de la puissance P_m recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor en son absence:

$$C_{pw} = P_m / (0.5 \rho S V_e^3) \quad (\text{I-2})$$

(La valeur maximale du C_{pw} définie par Betz, est égale à 0.592.)

Le troisième paramètre important est le coefficient du couple: c'est le rapport du couple moteur C_m qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien ($C_m = P_m / \Omega$) au couple aérodynamique Γ .

$$C_c = C_m / \Gamma = C_{pw} / \lambda \quad (I-3)$$

Les paramètres C_{pw} et C_c caractérisent les performances du capteur et sont habituellement représentés en fonction de λ .

Cependant plus généralement, on classe les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière:

- les capteurs à axe horizontal
- les capteurs à axe vertical
- les capteurs qui utilisent le déplacement d'un mobile (peu exploitable)
- les dispositifs statiques de récupération de l'énergie éolienne

Faisons donc l'inventaire des différents types de capteurs éoliens selon leur catégorie et intéressons-nous à leurs caractéristiques générales. Il faut cependant savoir que la plupart de ces capteurs éoliens comme le rotor Savonius ou encore les machines à clapets battants par exemple n'ont pas vraiment d'ouverture sur l'avenir et qu'aujourd'hui seuls les capteurs à axe horizontal bi-pales et tripales sont utilisés pour la production d'électricité à échelle internationale.

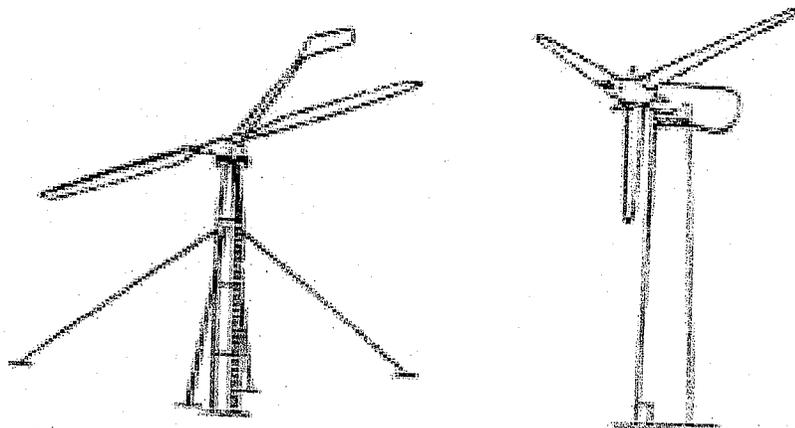
I.2.1 Les capteurs à axe horizontal

Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales.

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, "hélice au vent", et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, "hélice sous le vent" [3].

- *Les moulins hollandais* : ils se caractérisent par un assez bon coefficient de puissance de la machine pour des vitesses voisines de 2 à 3 m/s. Leur nombre de pales est élevée.
- *Les moulins américains* : ils peuvent comporter de 12 à 30 pales. Ces éoliennes fonctionnent bien jusqu'à un vent de 7 à 8 m/s, au-delà il faut prévoir un dispositif d'arrêt.
- *Les éoliennes rapides* : la puissance de ces capteurs est très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts. Les coefficients de moment et de puissance

sont optimaux pour des valeurs comprises entre 6 et 10 m/s. leur nombre de pales est très réduit.

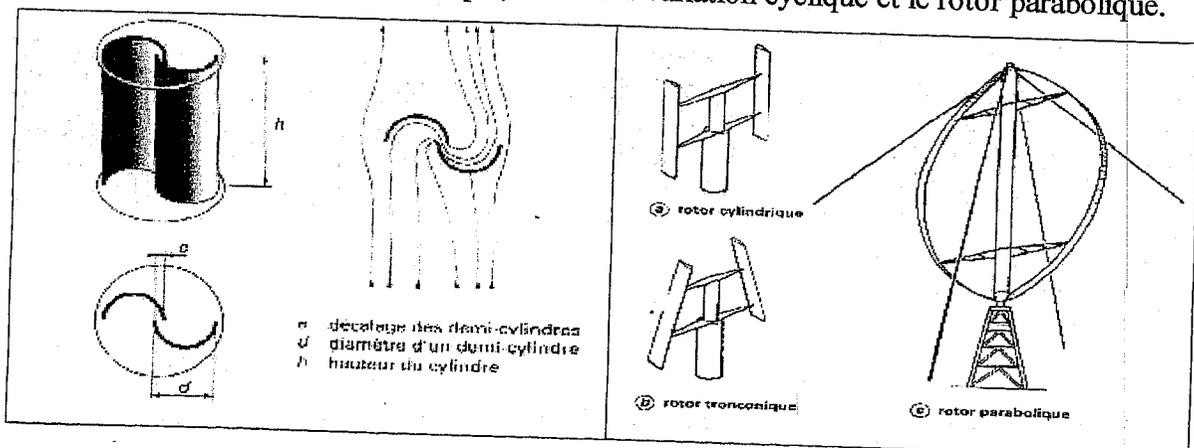


Eoliennes bipale et tripale à marche rapide

I.2.2 Les capteurs à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent. Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à traînées différentielles comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants [3].

- *Le rotor de Savonius* : Il est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Il est caractérisé par un grand couple de démarrage, il fonctionne à des vitesses de vent faible, voisines de 2 à 3 m/s.
- *Le rotor de Darrieus* : le principe repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus : le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique.

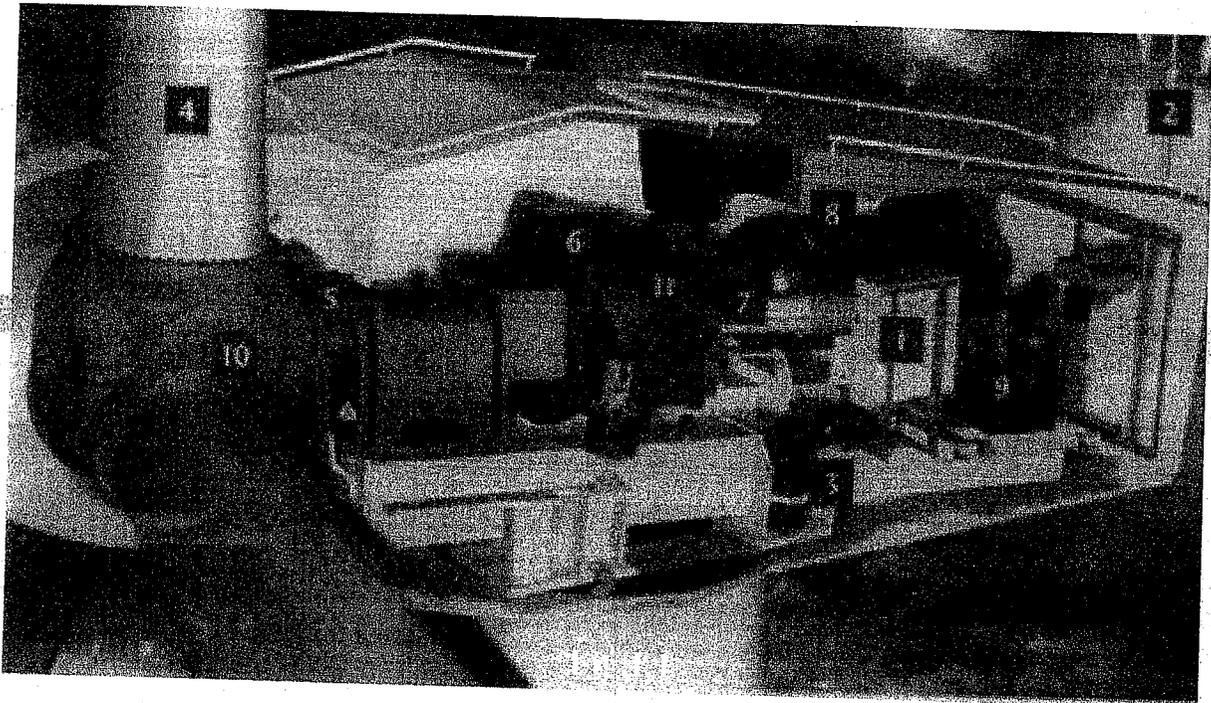


Ces facteurs fonctionnent à des très faibles vitesses du vent de direction horizontale.

I.3 Principes de base des aérogénérateurs (à axe horizontal)

I.3.1 Les composantes d'un aérogénérateur

Les principales composantes d'un système ordinaire de conversion de l'énergie éolienne sont : (Fig.I.1)



- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1) Automate. | 7) Axe rapide. |
| 2) Girouette. | 8) Génératrice. |
| 3) Moteur d'orientation. | 9) Unité hydraulique. |
| 4) Trois pales. | 10) Roulement. |
| 5) Axe lent. | 11) Frein disque. |
| 6) Multiplicateur. | |

La plupart des fabricants de turbines installent maintenant un démultiplicateur entre le rotor de la turbine à basse vitesse et la génératrice triphasée à haute vitesse. La configuration à entraînement direct, où le rotor de la turbine est couplé directement à la génératrice, est d'une grande fiabilité, exige une maintenance minime et permet parfois de réduire les coûts.

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales [3]:

- La longueur
- La largeur
- Le profil
- Les matériaux
- Le nombre de pales.



Fig. I-02: Hélice d'un aérogénérateur

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat, le site d'implantation...

a) La longueur

Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

b) La largeur

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

c) Le profil

Il est choisi en fonction du couple désiré. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (≥ 100 kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice. Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

d) Les matériaux

d) Les matériaux

Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche [3].

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

On rencontre plusieurs types de matériaux :

- *Le bois* : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.
- *le lamellé-collé* : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.
- *les alliages d'aluminium* pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
- *les matériaux composites* : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

I.3.2 Principe de fonctionnement

L'analyse qualitative du fonctionnement d'une éolienne prend en compte le vecteur de la vitesse de l'air \vec{v}_r par rapport à l'hélice, pour une section située à une distance r de l'axe de l'hélice. Dans la *fig. I-03*, on a représenté les vitesses et les forces sur la section considérée [4].

La vitesse \vec{v}_r résulte de la composition de la vitesse du vent \vec{v}_e et de la vitesse de la section due à la rotation $-(\vec{\Omega} \times \vec{r})$. L'angle formé par le vecteur \vec{v}_r et la corde de référence est dénommé angle d'incidence α .

La force \vec{F} exercée par le vent sur la section se décompose en deux forces :

- La portance $d\vec{L}$, normale à la vitesse \vec{v}_r .
- La force de traînée $d\vec{D}$, parallèle à la vitesse \vec{v}_r .

\vec{F} peut également se décomposer selon :

- La poussée en direction de rotation $d\vec{F}_t$.
- La poussée axiale dF_a .

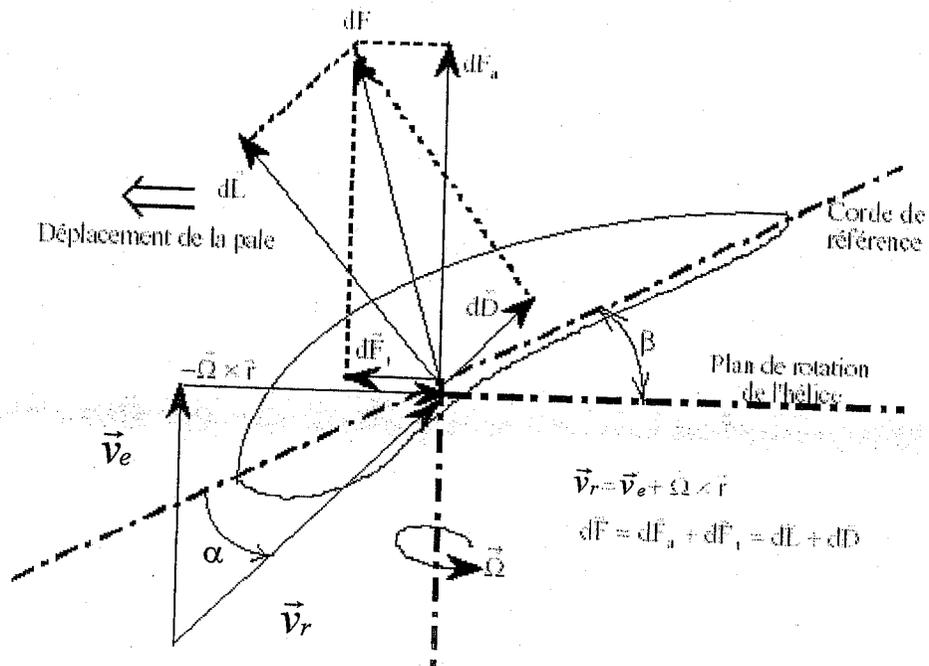


Fig.I-03 : Représentation des vitesses et des forces pour une section située à une distance r de l'axe de l'hélice.

Par intégration sur la largeur de la pale, on obtient :

La force de traînée :
$$D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 S \tag{I-04}$$

La force de portance :
$$L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 S \tag{I-05}$$

La poussée de rotation :
$$F_t = \frac{1}{2} C_z \rho v^2 S \tag{I-06}$$

La poussée axiale :
$$F_a = \frac{1}{2} C_x \rho v^2 S \tag{I-07}$$

Où C_D et C_L sont respectivement, les coefficients sans dimension, de traînée et de portance, S est la surface efficace de la pale et ρ la densité de l'air.

Les coefficients sans dimension C_D et C_L dépendent du profil de la pale et de l'angle d'incidence α . Cette dépendance est représentée dans la fig.I-04, pour un profil de type NACA. Dans l'analyse du fonctionnement des turbines éoliennes on utilise le diagramme du rapport C_x / C_z en fonction de l'angle d'incidence α . Ce rapport reflète le rendement de conversion de l'énergie éolienne.

Dans la fig.I-05, on constate qu'il existe un angle d'incidence optimal α_{opt} , pour lequel ce rendement est maximal.

L'analyse qualitative du fonctionnement de l'aéromoteur, en utilisant les diagrammes des vitesses et des forces de la fig.I-05, révèle divers aspects:

- Au démarrage de la turbine, $\vec{v}_r = \vec{v}_e$ puisque $\Omega \cdot r = 0$. L'angle d'incidence est grand (fig.I-05), et le couple très faible. Afin d'augmenter ce dernier, il est nécessaire d'adopter au démarrage un fort angle de calage, $\beta = \beta_D$ (voir Fig.1-3).
- Après la mise en marche de l'éolienne, en considérant que la vitesse du vent \vec{v}_e reste constante, comme la grandeur $\Omega \cdot r$ augmente, l'angle d'incidence diminue. Le point courant sur la caractéristique $C_x/C_z = f(i)$ se déplace vers la gauche, se situant autour du point optimal ($i \cong i_{opt}$) [5].

L'obtention d'un angle d'incidence optimal pour une vitesse périphérique $\Omega \cdot r$ qui dépend de la distance r , impose que l'angle de calage dépend aussi de r : $\beta(r)$.

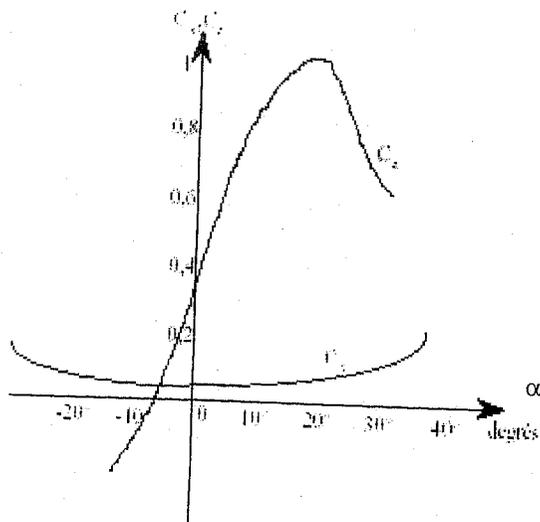


Figure I-04 Dépendance des coefficients C_x et C_z de l'angle d'incidence i

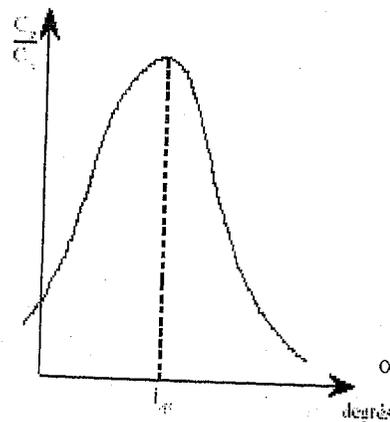


Figure I-05 Angle d'incidence optimal, α_{iop}

ole

air traversant une aire A d'un plan

V_s

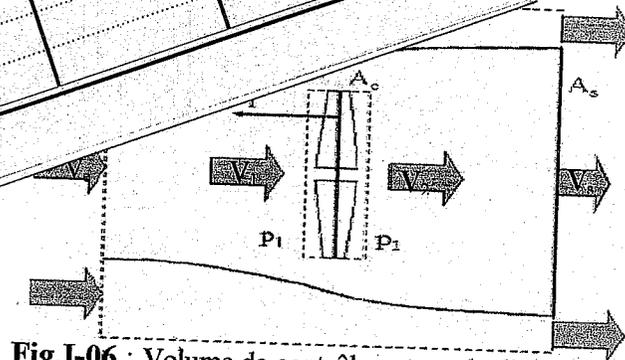
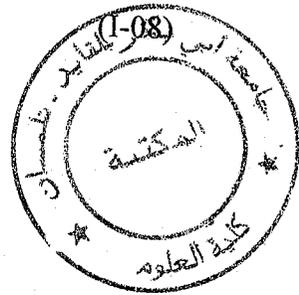


Fig.I-06 : Volume de contrôle autour de l'aérogénérateur.



Si l'aire S est balayée par les pales de diamètre D d'un aérogénérateur à axe horizontal, le flux d'air perturbé par la présence de la machine traverse un volume V dont la section droite de l'éolienne est sensiblement supérieure à S comme indiqué à la Fig.I-06.

Prenons ce volume V comme volume de contrôle. Il est choisi de telle sorte que la pression P_0 soit uniforme dans les sections d'entrée et de sortie (pression atmosphérique). La composante axiale de l'équation de la quantité de mouvement dans ce volume de contrôle s'écrit:

$$T = \rho \cdot A_s \cdot V_s \cdot (V_e - V_s) \quad (I-09)$$

Où T désigne la résultante des forces appliquées par la machine à l'air, et l'indice "s" réfère à la section de sortie.

Pour le volume englobant la machine, la même équation devient:

$$T = S \cdot (P_1 - P_2) \quad (I-10)$$

A partir des équations (I-09) et (I-10), on a :

$$\rho \cdot A_s \cdot V_s \cdot (V_e - V_s) = S \cdot (P_1 - P_2) \quad (I-11)$$

L'équation de l'énergie mécanique appliquée deux fois permet d'écrire:

$$P_1 - P_0 = \rho \frac{V_e^2 - V_1^2}{2}$$

$$P_0 - P_2 = \rho \frac{V_2^2 - V_s^2}{2}$$

$$P_1 - P_2 = \rho \frac{V_s^2 - V_e^2}{2}$$

Si x désigne le rapport entre la vitesse V_s du sillage résiduel et celle du vent, cette dernière équation combinée à celle (I-11) permet d'obtenir:

$$\frac{A_s}{S} = \frac{V_e + V_s}{2 \cdot V_s} = \frac{1+x}{2 \cdot x} \quad \text{avec} \quad x = \frac{V_s}{V_e} \quad (\text{I-12})$$

La puissance prélevée au vent correspond à son flux d'énergie cinétique:

$$P_p = \frac{V_e^2 - V_s^2}{2} \cdot \rho \cdot A_s \cdot V_s = \frac{A_s \cdot V_s}{S} \left(1 - \frac{V_s^2}{V_e^2}\right) \frac{\rho \cdot S \cdot V_e^2}{2} = \frac{(1+x)(1-x^2)}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3 \quad (\text{I-13})$$

$$C_{pw} = \frac{(1+x)(1-x^2)}{2} \quad (\text{I-14})$$

$$P_p = C_{pw} \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot S \cdot V_e^3 \quad (\text{I-15})$$

C_{pw} : coefficient de puissance.

Ce coefficient, qui est une fonction de la vitesse spécifique $\lambda = \frac{\Omega R}{V}$

$$C_{pw} = C_{pw}(\lambda) \quad (\text{I-16})$$

La fraction de puissance du vent prélevée par une machine de section A_e est fonction du seul rapport x entre la vitesse résiduelle (à laquelle correspond l'énergie cinétique perdue), et celle du vent (fig.I-07). Dès lors, le rendement maximum de la machine est :

$$\frac{dP_p}{dx} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dP_p}{dx} < 0 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{1}{3} \quad \text{et} \quad C_{pMax} = \frac{16}{27} = 0.593$$

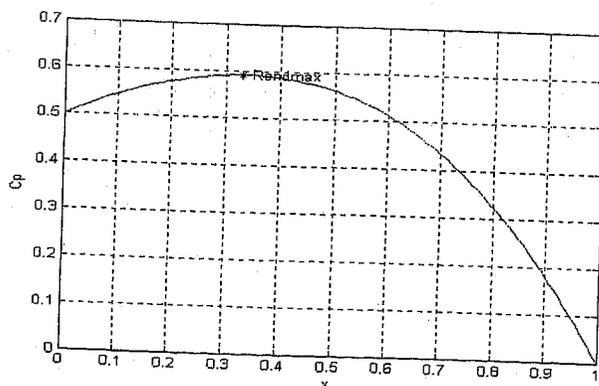


Fig.I-07 : rendement de la puissance prélevée en fonction de x .

Betz a montré que seulement une fraction de l'énergie éolienne peut être convertie en énergie mécanique. Elle est limitée par le coefficient C_{pw} , où son maximum est de 0,593.

Le couple sur l'arbre (Γ) est donné par :

$$\left. \begin{aligned} P_p &= C_{pw} \frac{1}{2} \rho AS v_e^3 \\ \text{et} \\ \lambda &= \frac{\Omega R}{v_e} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Gamma = \frac{P_p}{\Omega} = \frac{1}{2} \frac{C_{pw}}{\lambda} \rho v_e^2 R S \quad (I-17)$$

ou par la relation

$$\Gamma = \frac{1}{2} C_\Gamma \rho R S \quad (I-18)$$

où C_Γ est le coefficient de couple, relié au coefficient de puissance par la relation

$$C_p(\lambda) = \lambda C_\Gamma(\lambda) \quad (I-19)$$

Les formes typiques des caractéristiques $C_p(\lambda)$ et $C_\Gamma(\lambda)$, pour une éolienne à pas fixe, sont respectivement présentées sur les figures I-08 et I-09.

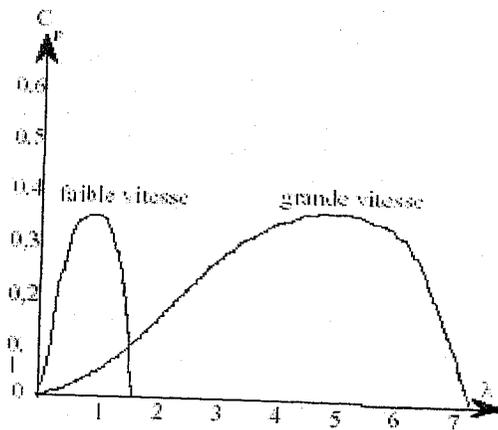


Fig.I-08 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique

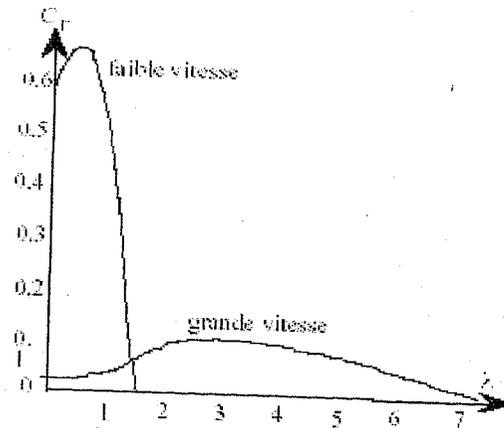


Fig.I-09 : Coefficient de couple en fonction de la vitesse spécifique

I.3.4 Système de régulation

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . La puissance P_n est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_{en} , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_{en} la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante [6].

A coté de la vitesse nominale V_{en} , on spécifie aussi:

- La vitesse de démarrage V_D , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- la vitesse maximale du vent V_M , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses V_D , V_{en} et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

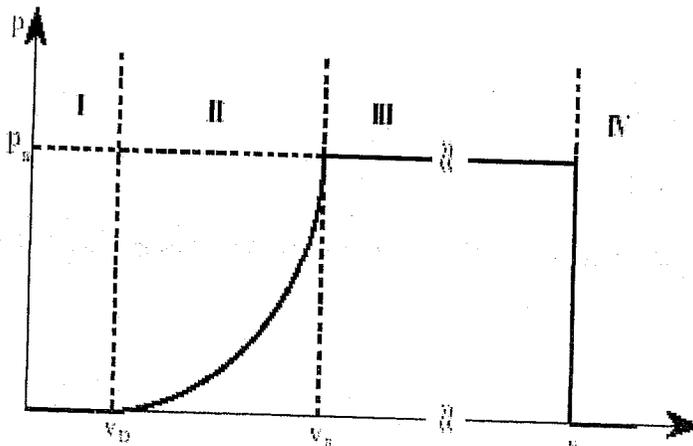


Fig.I-10 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

- La zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas).
- La zone II, la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_e .
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante (régulation centrifuge) et où la puissance P fournie reste égale à P_n (si la charge n'est fonction que de la vitesse).
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

La régulation consiste à modifier l'angle de calage β par deux méthodes :

- Réduction de l'angle d'incidence. Si la vitesse de rotation croît, on augmente l'angle de calage, l'angle d'incidence décroît et le point de fonctionnement se déplace sur la caractéristique $C_z/C_x = f(i)$ dans le sens montré dans la *fig.I-11*.
- Décrochage aérodynamique. L'augmentation de la vitesse fait diminuer l'angle de calage, l'angle d'incidence dépasse la valeur optimale et le point de fonctionnement évolue dans le sens montré dans la *fig.I-12*. La deuxième solution est la plus utilisée, du fait que la pente de la courbe de la *fig.I-12*, qui caractérise le processus de décrochage aérodynamique est très grande. Ceci assure un grand coefficient d'amplification dans la boucle de régulation, donc un petit statisme du système de stabilisation de la vitesse de rotation.

La régulation de la vitesse autour de la vitesse nominale est réalisée par des dispositifs mécaniques centrifuges, incorporés dans le moyeu de l'éolienne.

Il existe plusieurs types de systèmes [6,7]:

a) Régulation de la vitesse du rotor

Ce type de régulation maintient la vitesse du rotor constante et empêche les vitesses excessives.

Ce système peut être soit actionné par la force centrifuge, soit sensible à la vitesse du vent et la vitesse de rotation.

En général, les régulateurs centrifuges sont utilisés dans les petites éoliennes et les régulateurs sensibles à la vitesse de rotation et à la vitesse du vent sont montés sur les grosses éoliennes.

Remarques

- L'aérogénérateur usuel est prévu pour fournir un rendement maximal pour des vents compris entre 4 à 11 m/s.
- Les vents de 11 à 18 m/s sont suffisamment fréquents pour permettre un fonctionnement limité car il existe un niveau constant de captation d'énergie dans cette gamme de vitesses.
- Lorsque la vitesse du vent dépasse 18 m/s la turbulence et les rafales augmentent. sont cause d'efforts excessifs sur les structures.

b) Mise en drapeau des pales d'hélice

Couramment, pour limiter la vitesse de rotation et la puissance fournie soit :

- On diminue l'angle d'incidence des pales par un ressort déclenché par la force centrifuge et en annulant la portance.
- Soit, on augmente l'angle d'incidence jusqu'à la perte de vitesse.

c) Frein aérodynamique

Ce type de freinage est utilisé si le diamètre de l'éolienne est inférieur ou égal à 6 m ; les volets de freinage augmentant la traînée, la vitesse diminue mais l'effet de la force centrifuge subsiste même à diamètre limité.

d) Rotation de l'axe de l'hélice

Utilisée seulement pour les petites éoliennes, cette méthode de limitation de la puissance fait tourner le plan du rotor.

e) Régulation d'embardees

Ce type de régulation est utilisé pour orienter l'éolienne en fonction des changements de direction du vent (sauf les machines à axe vertical rotor Darrieus).

f) Régulation combinée production / consommation

Pour ce genre de régulation, il faut déterminer la quantité des puissances produites et consommées et elle peut être associée ou non à la régulation de la vitesse du rotor.

Remarques

- Le cas idéal est tel que $P_{consommée} = P_{disponible}$.
- Si $P_{consommée} < P_{disponible}$ l'excédent est éliminé par le régulateur puissance de sortie vers le stockage.
- Si $P_{consommée} > P_{disponible}$ l'excédent de charge doit être éliminé sinon l'éolienne s'arrête.

I.3.5 Générateurs électriques

En ce qui concerne le générateur électrique, la solution adoptée dépend d'une série de facteurs parmi lesquels on trouve: la puissance nominale, les modalités d'utilisation de l'aérogénérateur (en site isolé, connecté en réseau de puissance infinie, etc.), la nature de la charge et les paramètres de l'énergie électrique à fournir.

Les principaux types de générateurs électriques utilisés sont: Les générateurs à courant continu, les alternateurs à aimants permanents, les générateurs synchrones et les générateurs asynchrones classiques.

I.3.6 Structure des systèmes de conversion

Les installations qui utilisent l'énergie éolienne comportent classiquement cinq parties :

- Une turbine éolienne, avec ses annexes mécaniques (régulation, sécurité, réduction), qui, lorsqu'elle est exposée à un vent de vitesse V_e , tourne à la vitesse Ω et fournit sur son arbre un couple de moment.
- Un générateur électrique, qui transforme l'énergie éolienne en énergie électrique alternative ou continue.
- Une charge, ou utilisation, qui reçoit cette énergie électrique. Cela peut être une résistance (chauffage électrique), un moteur, une pompe, un réseau de distribution d'énergie électrique. Selon la nature de cette charge les exigences sur le conditionnement de l'énergie électrique utilisée sont très différentes.
- Un convertisseur qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge et qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.
- Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et, éventuellement en régime dynamique.

La plus simple structure de conversion de l'énergie éolienne est présentée dans la *fig.I-13*:

T : La turbine.

M : Le multiplicateur de vitesse.

GE : Générateur électrique.

EP : Le circuit électronique de puissance.

On considère que le système alimente une charge électrique isolée.

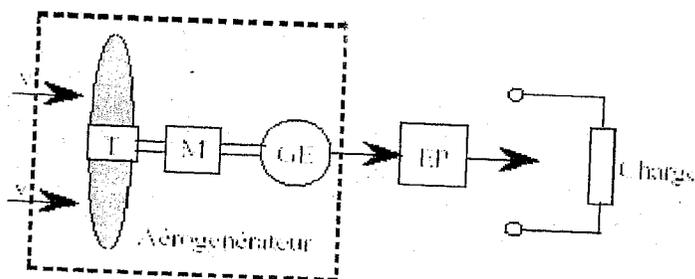


Fig.I-13: Structure de conversion de l'énergie éolienne

Le caractère aléatoire du vent pose le problème de la régularisation de l'énergie fournie aux consommateurs par les aérogénérateurs. Il est possible que, dans certains intervalles de temps, la demande d'énergie soit plus grande que l'énergie pouvant être fournie par l'aérogénérateur.

C'est pourquoi on prévoit des solutions de régularisation par:

- Des sources alternatives d'énergie (réseau, diesel-générateurs ...).
- L'utilisation de l'énergie stockée pendant les périodes de surproduction de l'aérogénérateur (systèmes de pompage, accumulateurs).
- On propose un schéma général de conversion de l'énergie éolienne dans lequel on reflète le bilan des puissances dans le réseau d'un utilisateur local (fig.I.14).

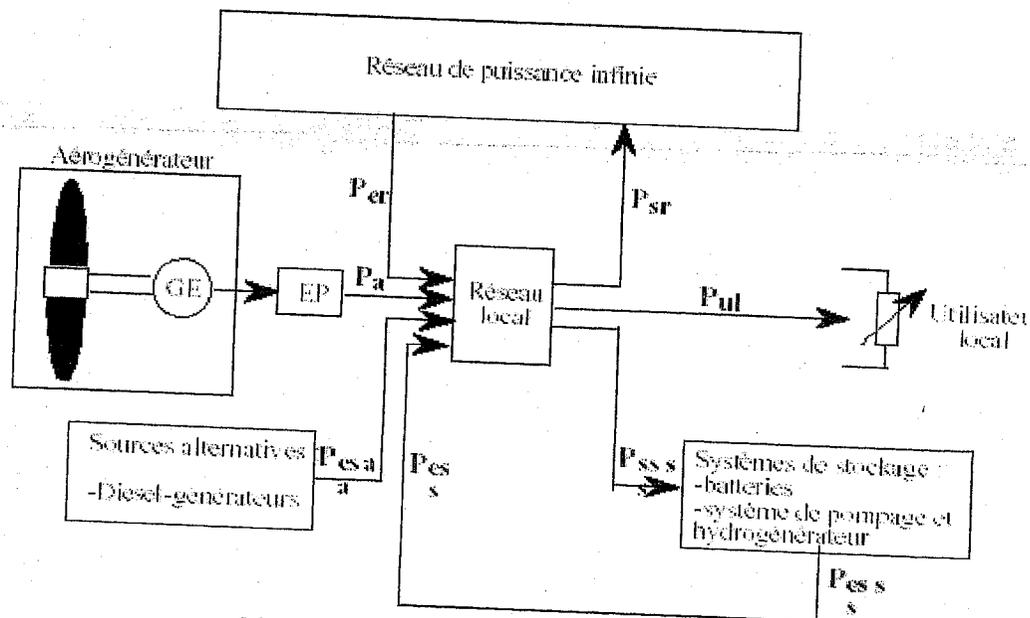


Fig.I-14: Schéma général de conversion de l'énergie éolienne

Dans toutes les situations, il est souhaitable que l'aérogénérateur assure une conversion optimale de l'énergie éolienne disponible sur l'instant, de manière que la consommation sur des sources alternatives soit minimale. Il est évident que le système de commande pour l'optimisation en temps réel du système énergétique local est important, par rapport au critère du rendement de la conversion de l'énergie éolienne.

I.4 Conclusion

- La conception et la modélisation des aérogénérateurs exigent une étude préalable sur :
- ❖ Le vent où l'énergie éolienne disponible sur un site. Cette étude ne porte pas seulement sur le vent météorologie, mais aussi sur les brises qui ont une naissance locale dépendent de la géographie et la géologie du site. Donc l'implantation des éoliennes dans un site exige une étude locale pour la détermination des paramètres d'adaptation (vitesse du vent moyenne annuelle et journalière, rugosité ...).
 - ❖ La conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique est limitée par le coefficient de puissance C_{PW} où son maximum est de 0.593 et le coefficient du couple C_T .
 - ❖ Le coefficient de puissance C_{PW} et le coefficient de portance C_L nécessitent une étude directe du profil des pales et du type de capteur à utiliser. les hélices à axes horizontaux devraient donner de meilleures performances. Le développement des éoliennes est actuellement concentré sur des hélices à axes horizontaux pouvant aller jusqu'à 1 MW ou plus.



CHAPITRE II

La distribution de pression sur un capteur éolien

La distribution de pression sur un capteur éolien

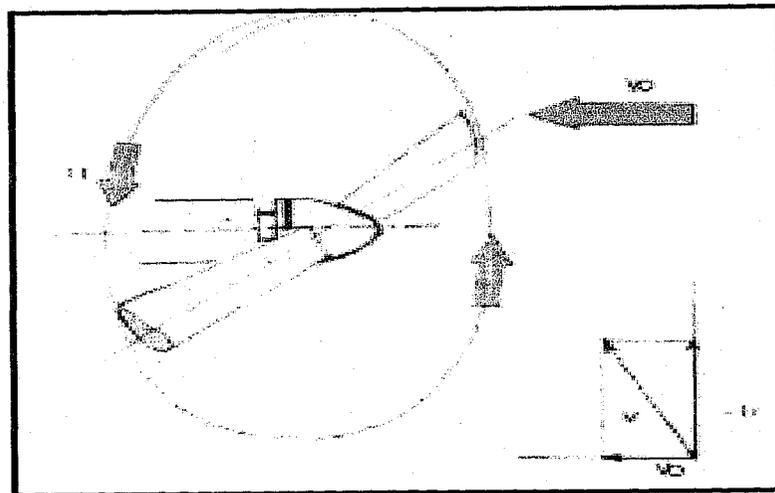
Notre but dans ce chapitre est de modéliser l'interaction *Vent-aérogénérateur*. Pour cela, nous présentons les équations régissant la dynamique des fluides en considérant le vent comme un fluide parfait irrotationnel et incompressible et nous déduisons la distribution de pression autour d'une pale.

II.1 INTRODUCTION

L'hélice est l'instrument la plus importante dans la conversion de l'énergie éolienne, on l'appelle aussi un capteur éolien. Ce capteur est défini par un paramètre très important c'est *le coefficient de puissance C_{PW}* qui dépend essentiellement du profil des pales.

L'écoulement non visqueux incompressible est régi par l'équation de Laplace. Une méthode extrêmement générale pour résoudre cette équation est la méthode de singularités.

Le potentiel complexe qui caractérise l'écoulement au-dessus des pales peut être induit par de diverses distributions des singularités. Le choix du type de singularités à employer dépend des conditions de frontières imposées.



II.2 Position du problème

Dans ce qui suit, on suppose toujours que l'écoulement de l'air est un écoulement:

- bidimensionnel.
- stationnaire: indépendant du temps.
- non visqueux: $\mu=0$.
- irrotationnel: $\Omega = 0$.
- Incompressible : puisque les aérogénérateurs se trouvent toujours dans des systèmes thermodynamiques ouvert (sites d'implantation des éoliennes).

Donc à chaque instant et en tout point du fluide, on a les deux relations suivantes [8]:

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad (\text{fluide incompressible}) \quad (\text{II.-01})$$

$$\operatorname{rot}(\vec{V}) = 0 \quad (\text{fluide irrotationnel}) \quad (\text{II-02})$$

(En mouvements non permanents, ces conditions sur la distribution spatiale de la vitesse sont satisfaites à chaque instant).

A ces équations sont jointes des conditions aux limites. Nous avons en vue ici les mouvements permanents issus de translations uniformes autour d'obstacles fixes, en fluide indéfini. L'obstacle en translation permanente dans un fluide au repos à l'infini pose le même problème dans les axes qui lui sont liés, puisqu'il n'y a ni accélération d'entraînement ni accélération de CORIOLIS. Dans un cas comme dans l'autre, le mouvement doit tendre régulièrement vers la translation uniforme à l'infini. Tandis que sur l'obstacle, la vitesse doit être tangente à celui-ci [8].

Ces équations et ces conditions aux limites constituent un problème purement cinématique et linéaire. Une fois le problème est résolu, donc les vitesses déterminées en tout point, on déduit les pressions d'après la constance de la quantité de BERNOULLI. La non linéarité du problème ne réapparaît qu'à ce niveau, où elle ne pose plus de difficulté.

Revenons sur la mécanique des fluides parfait. L'équation locale d'Euler est donnée par la relation suivante [9]:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \overrightarrow{rot}(\vec{V}) \wedge \vec{V} + \overrightarrow{grad} \left(\rho \frac{V^2}{2} + p + \rho g z \right) = \vec{0} \quad (II-03)$$

V : La vitesse d'écoulement du fluide.

ρ : La masse volumique de l'air.

g : La gravitation.

z : La verticale ascendante.

En mouvement irrotationnel, d'une part le terme tourbillon disparaît. D'autre part et d'après l'éq.II-02, la vitesse \vec{V} en tout point M du fluide dérive d'un potentiel scalaire ϕ :

$$\vec{V}(M) = \overrightarrow{grad}\phi(M) \quad (II-04)$$

D'un autre côté, en mouvement permanent :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \vec{0} \quad (II-05)$$

Donc l'équation (II-03) se réduit à la relation suivante :

$$\overrightarrow{grad} \left(\rho \frac{V^2}{2} \right) + \overrightarrow{grad} P = 0 \quad (II-06)$$

où : $P = p + \rho g z$

L'équation (II-01) implique ensuite que :

$$\Delta \phi(M) = 0 \quad (II-07)$$

Enfin, en tout point Pt de l'obstacle, où la normale à celui-ci est \vec{N} , la composante normale de la vitesse doit être nulle :

$$\vec{V} \cdot \vec{N}(Pt) = \overrightarrow{grad}\phi \cdot \vec{N}(Pt) = \frac{\partial \phi}{\partial N}(Pt) = 0 \quad (II-08)$$

Le problème ainsi transcrit sur le potentiel ϕ est un problème de *Neumann extérieur*.

II.3 La distribution de pression autour d'un profil

L'écoulement non visqueux incompressible et irrotationnel est régi par l'équation de Laplace. Une méthode extrêmement générale pour résoudre cette équation est la méthode de singularités.

Nous allons montrer d'abord que toute solution de l'équation de Laplace dans un domaine de l'espace à deux ou trois dimensions peut s'exprimer explicitement, sous forme intégrale, dès qu'on connaît ses valeurs ainsi que celles de sa dérivée normale, sur le bord du domaine [10].

En fait, la méthode des singularités est bien adaptée à des problèmes linéaires à coefficients constants, de préférence elliptique ou parabolique. Elle est spécialement performante dans le cas de problèmes en domaine non borné (écoulement d'air autour d'un profil d'aile ou d'avion) [10].

II.3.1 La fonction de Green

Appelons *fonction de Green de l'équation de Laplace* la fonction $G(M, Pt)$ de deux points M et Pt définie par [10]:

$$G(M, Pt) = \frac{1}{2\pi} \text{Log}(MPt) \quad \text{en dimension 2,} \quad (\text{II-09})$$

$$G(M, Pt) = -\frac{1}{4\pi} \frac{1}{MPt} \quad \text{en dimension 3,} \quad (\text{II-10})$$

$G(M, P)$ est :

- Symétrique en M et Pt .
- Singulière lorsque $M = Pt$.
- Harmonique en M (ou en Pt), pour $M \neq Pt$.

Interprétation mécanique :

Si $\vec{U} = \overrightarrow{\text{grad}}_M G(M, Pt)$ est un champ de vitesse. Le flux de $\vec{U}(M)$ sortant d'une courbe fermée C (en dimension 2) ou d'une surface fermée S (en dimension 3) est

- (i) Nul si Pt est extérieur à C (ou S).
- (ii) Egal à 1 si Pt est intérieur à C (ou S).

On dit que $G(M, Pt)$ est le potentiel, en M , d'une source de débit unité placée en Pt .

Formules explicites

Soit ξ, η les coordonnées de Pt et x, y celles du point « courant » M . soit α, β les composantes du vecteur unitaire $\vec{u} : \alpha^2 + \beta^2 = 1$.

Potentiel de la source de débit unité placée en Pt :

$$G(M, Pt) = \frac{1}{4\pi} \text{Log}[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2] \quad \text{en dimension 2,} \quad (\text{II-11})$$

Potentiel du doublet de direction \vec{u} et d'intensité unité placée en Pt :

$$\frac{\partial}{\partial u_P} G(M, Pt) = - \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha(x - \xi) + \beta(y - \eta)}{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \quad \text{en dimension 2,} \quad (\text{II-12})$$

II.3.2 Résolution du problème

a) Principales singularités planes : source

Le concept de source modélise théoriquement ce qui se passe concrètement sur une plaque sur laquelle vient se briser un jet. En faisant abstraction du jet pour ne retenir que le mouvement plan sur la plaque, tout se passe comme s'il y avait apparition de matière dans la zone d'impact, tandis que la vitesse radiale devient grande à son approche est change de signe à sa traversée. Ces deux raisons rendent cette zone suspecte. En théorie, On est amené à concentrer cette zone en un point, qui devient singulier, et on constate qu'on peut construire un champ de ce type qui soit incompressible et irrotationnel partout à l'extérieur. On obtient ainsi une source ponctuelle plane (*Fig.II.1*) [10].

La source étant choisie comme origine, on postule que le champ de vitesse associé à sa présence, regardé comme induit par elle, est en tout point purement radial ; c'est à dire que ses lignes de courant sont les droites issues de l'origine. Si r et θ sont les coordonnées polaires, La nature radiale de l'écoulement implique:

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} V_r = \frac{D}{r} \\ V_\theta = 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{V} = \begin{pmatrix} V_x = \frac{D}{r} \cos\theta \\ V_y = \frac{D}{r} \sin\theta \end{pmatrix} \quad (\text{II-13})$$

Pour résumer la définition géométrique première de ce champ sous forme vectorielle, on écrit :

$$\vec{V}(M) = D \frac{\vec{R}}{r^2} \quad (\text{II-14})$$

D : est l'intensité de la source.

De fait, sur n'importe quel cercle centré à l'origine, on trouve que la source induit le débit $\sigma = 2\pi D$.

Si on compte le débit par référence à un point du demi-axe $x > 0$, et la circulation par référence à un point du cercle de rayon l , on obtient immédiatement le potentiel et la fonction de courant de la source ponctuelle plane :

$$\phi = D \text{Log}(r) \quad , \quad \psi = D \cdot \theta$$

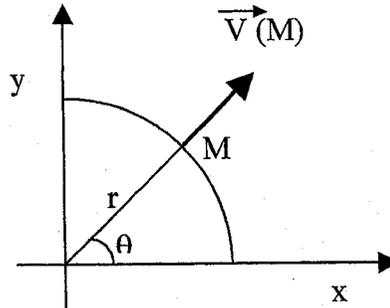


Fig.II.1: Représentation d'une source à 2D

Comme nous avons déjà dit, la méthode que nous allons utiliser pour résoudre ce problème est celle des singularités traitée en potentiel de simple couche [10]. Elle consiste essentiellement :

- A approcher la surface Σ par un polyèdre (Fig.II.2).
- A approcher la distribution de sources par une distribution constante par morceau ; auquel cas on sait :
- Calculer analytiquement le potentiel induit en tout point.
- Ecrire l'équation intégrale en un point par facette (ou par segment); ce point dénommé "point de contrôle" ou "point de collocation", est généralement choisi au centre de gravité de la facette (ou au milieu du segment, voir le dessin ci-dessous).
- Et bien entendu, on applique la condition de Neumann sur Σ :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n_{\Sigma}} = g \quad (\text{Fonction donnée}) \quad (\text{II-15})$$

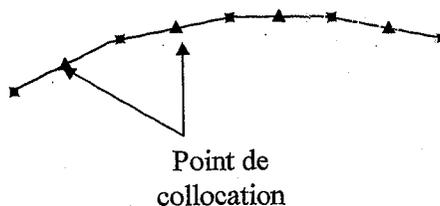


Fig.II.2 : discrétisation d'un profil.

Dans la pratique, la méthode des singularités comporte donc, après choix d'une discrétisation, deux étapes successives :

- (i) Le calcul des éléments de la matrice (appeler "coefficients d'influence").
- (ii) La résolution du système.

b) Discrétisation

On approche la courbe donnée Σ par une suite de N segments très petits, et on considère que la densité constante sur chacun de ses segments. Le problème ainsi discrétisé consiste alors à trouver un nombre fini de valeurs de débit, soit N , égale à celui des éléments.

Soit $z_i, i \in [1, N]$, l'affixe du $i^{\text{ème}}$ sommet de la ligne brisée, avec évidemment $z_{n+1} = z_1$.

On choisit pour $i^{\text{ème}}$ point de contrôle \tilde{z}_i le milieu du $i^{\text{ème}}$ segment $[z_i, z_{i+1}]$, soit : $\tilde{z}_i = \frac{z_i + z_{i+1}}{2}$

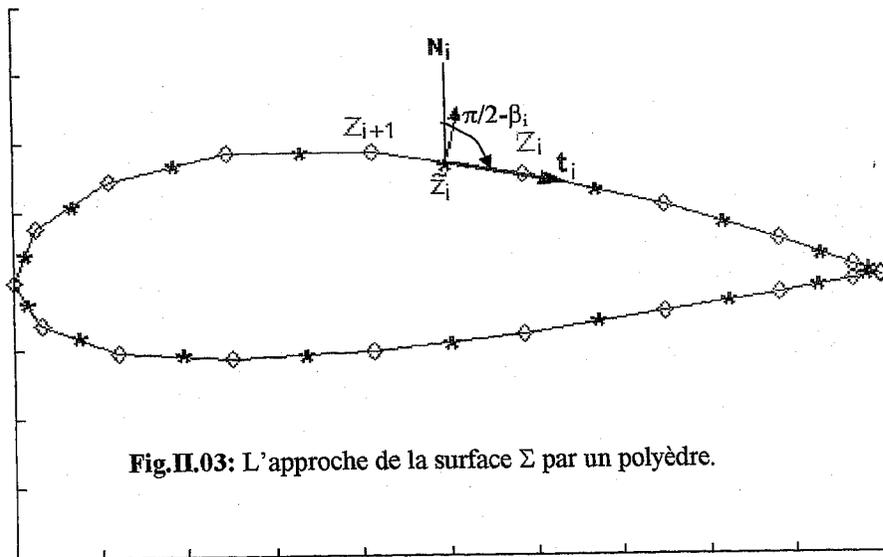


Fig.II.03: L'approche de la surface Σ par un polyèdre.

c) Potentiel créé par un segment, dans le plans complexe

Puisqu'on considère que l'écoulement est un écoulement plan et stationnaire : le champ des vitesses \vec{V} a pour seules composantes $u(x,y)$ selon x et $v(x,y)$ selon y . Et un écoulement irrotationnel $\overline{rot\vec{V}}=0$; il existe alors un potentiel de vitesse réel $\phi(x,y)$, tel que :

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad ; \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{II-16}$$

Ainsi le fluide incompressible $div \vec{V}=0$; il existe alors une fonction de courant $\psi(x,y)$, telle que :

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad ; \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (II-17)$$

de (II-16) et (II-17), nous déduisons que le couple de fonction $\phi(x,y)$ et $\psi(x,y)$ vérifie les conditions de Cauchy-Riemann, et donc que la fonction

$$f(z) = \phi(x,y) + i \psi(x,y) \quad (II-18)$$

Est une fonction holomorphe. On dit que f est un *potentiel complexe de l'écoulement*.

On montre aisément que la vitesse complexe est donnée par la relation suivante [10]:

$$w(z) = \frac{df}{dz} = u - iv \quad (II-19)$$

Ainsi, le potentiel complexe d'une source ponctuelle de débit σ placée en \tilde{z}_i est $\sigma \text{Log}(z)/2\pi$, le potentiel réel correspondant étant bien $\sigma \text{Log}(r)/2\pi$ (Eq. II-09).

Considérons le $j^{\text{ème}}$ segment $[z_j, z_{j+1}]$, incliné de l'angle β_j par rapport à l'axe \bar{x} .

Posons :

$$z_0 = z_j + \exp(i \beta_j) \cdot t \quad (II-21)$$

D'où :

$$dz_0 = \exp(i \beta_j) dt \quad (II-22)$$

z_0 étant le point courant du segment $[z_j, z_{j+1}]$ et t l'abscisse curviligne correspondante.

Le potentiel complexe engendré en un point z quelconque par une distribution de sources de densité constante σ_j sur ce segment est égal à

$$f(z) = \frac{\sigma_j}{2\pi} e^{-i\beta_j} \int_{z_j}^{z_{j+1}} \text{Log}(z-z_0) dz_0 \quad (II-23)$$

une primitive de $\text{Log}(z)$ étant $z(\text{Log}z - 1)$, nous trouvons :

$$f(z) = \frac{\sigma_j}{2\pi} e^{-i\beta_j} \left\{ (z_{j+1}-z) [\text{Log}(z-z_{j+1})-1] - (z_j-z) [\text{Log}(z-z_j)-1] \right\} \quad (II-24)$$

d'où la vitesse complexe :

$$w(z) = u - iv = \frac{df}{dz} = \frac{\sigma_j}{2\pi} e^{-i\beta_j} \text{Log} \frac{z-z_j}{z-z_{j+1}} \quad (II-25)$$

d) Coefficients d'influence

En particulier, au point de contrôle :

$$\tilde{z}_i = \frac{1}{2} (z_i + z_{i+1})$$

milieu du $i^{\text{ème}}$ segment, la formule (II-24) s'écrit

$$u_{i-i} \quad v_i = \frac{\sigma_i}{2\pi} e^{-i\beta_i} \text{Log} \left(\frac{\tilde{z}_i - z_j}{\tilde{z}_i - z_{j+1}} \right) \tag{II-25}$$

Pour obtenir les composantes normale et tangentielle de la vitesse au point z_i , il suffit de faire une rotation des axes.

Supposons qu'on numérote les sommets de la ligne brisée dans le sens des aiguilles d'une montre (Fig.II-03). Le vecteur unitaire \vec{t}_i tangent au $i^{\text{ème}}$ segment va de z_i vers z_{i+1} ; le vecteur normale extérieur \vec{n}_i s'en déduit alors par rotation $+\frac{\pi}{2}$. On passe du couple de vecteurs unitaires (\vec{x}, \vec{y}) au couple (\vec{t}_i, \vec{n}_i) par rotation β_i , où β_i est l'inclinaison du segment $[z_i, z_{i+1}]$ par rapport à l'horizontale.

Si l'affixe d'un même point du plan est z_{xy} dans le repère $(O; \vec{x}, \vec{y})$ et z_m dans le repère $(\tilde{z}_i; \vec{t}_i, \vec{n}_i)$, et si l'on note (θ, r) ses coordonnées polaires dans le repère $(\tilde{z}_i; \vec{x}_i, \vec{y}_i)$ il vient alors :

$$\left. \begin{aligned} z_{xy} &= \tilde{z}_i + r e^{i\theta} \\ z_m &= r e^{i(\theta - \beta_i)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow z_{xy} = \tilde{z}_i + z_m e^{i\beta_i}$$

Si $(u_i)_i$ et $(v_n)_i$ sont les composantes tangentielle et normale de la vitesse créée par le $j^{\text{ème}}$ segment, on en déduit :

$$\begin{aligned} (u_{i-i} \quad v_n)_i &= \frac{df}{dz_m} \\ &= \frac{df}{dz_{xy}} \frac{dz_{xy}}{dz_m} = (u_{i-i} \quad v_n) e^{i\beta_i} \end{aligned}$$

Où $f(z)$ est donnée par la relation (II-23).

D'où finalement :

$$(u_{i-i} \quad v_n)_i = \frac{\sigma_j}{2\pi} e^{i(\beta_i - \beta_j)} \text{Log} \frac{\tilde{z}_i - z_j}{\tilde{z}_i - z_{j+1}} \tag{II-26}$$

Faisons $\sigma_j = 1$ en (II-26), et notons alors $A_{ij} - i B_{ij}$ son premier membre :

$$A_{ij} = (u_i)_{i, \sigma_j=1} \quad ; \quad B_{ij} = (v_n)_{i, \sigma_j=1} \tag{II-27}$$

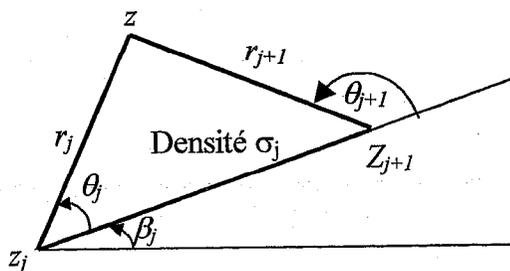
Il vient donc:

$$A_{ij} - i B_{ij} = \frac{1}{2\pi} e^{i(\beta_i - \beta_j)} \text{Log} \frac{\tilde{z}_i - z_j}{\tilde{z}_i - z_{j+1}} \tag{II-28}$$

A_{ij} est la composante tangentielle de la vitesse induite au milieu du $i^{ème}$ segment par une distribution de source de densité unité sur le $j^{ème}$ segment, et B_{ij} est la composante normale correspondante.

Les B_{ij} sont appelés coefficients d'influence.

Il est alors commode d'introduire les largeurs r_j et r_{j+1} des côtés $[z_j, z]$ et $[z_{j+1}, z]$ du triangle (z, z_j, z_{j+1}) , ainsi que les angles $\theta_j = (\angle z_j z_{j+1}, z_j z)$ et $\theta_{j+1} = (\angle z_j z_{j+1}, z_{j+1} z)$. Avec ses notions, il vient



$$\begin{cases} z - z_j = r_j e^{i(\beta_j + \theta_j)} \\ z - z_{j+1} = r_{j+1} e^{i(\beta_j + \theta_{j+1})} \end{cases} \quad (II-29)$$

avec

$$\begin{cases} r_j \sin(\theta_j) = r_{j+1} \sin(\theta_{j+1}) \\ r_j \cos(\theta_j) = l_j + r_{j+1} \cos(\theta_{j+1}) \end{cases} \quad (II-30)$$

En notant $l_j = [z_{j+1}, z_j]$.

L'équation (II-24) s'écrit alors :

$$w = u - iv = \frac{\sigma_j}{2\pi} e^{-i\beta_j} \left[\text{Log} \frac{r_j}{r_{j+1}} + i (\theta_j - \theta_{j+1}) \right] \quad (II-31)$$

on procède de même pour (II-28) :

$$A_{ij} - iB_{ij} = \frac{1}{2\pi} [\cos(\beta_i - \beta_j) + i \sin(\beta_i - \beta_j)] \left[\text{Log} \frac{r_j}{r_{j+1}} + i (\theta_j - \theta_{j+1}) \right] \quad (II-32)$$

d'où, pour $i \neq j$,

$$\begin{cases} A_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left[\cos(\beta_i - \beta_j) \text{Log} \frac{r_j}{r_{j+1}} + (\theta_{j+1} - \theta_j) \sin(\beta_i - \beta_j) \right] \\ B_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left[(\theta_{j+1} - \theta_j) \cos(\beta_i - \beta_j) + \sin(\beta_i - \beta_j) \text{Log} \frac{r_j}{r_{j+1}} \right] \end{cases} \quad (II-33)$$

Pour $i=j$, et donc $\beta_i = \beta_j$, le passage à la limite $z \rightarrow \tilde{z}_i$ par l'extérieur de la ligne brisée fournit

$$A_{ij} = 0 \text{ et } B_{ij} = 1/2,$$

A_{ij} est appelé *coefficient d'auto-influence*.

En ce qui concerne les autres coefficients (correspondant à $i \neq j$), l'une des déterminations de l'angle $\theta_i - \theta_j$ est petite en valeur absolue soit par ce que la longueur du $j^{\text{ème}}$ segment est petite par rapport à sa distance au point \tilde{z}_i , soit parce que, la discrétisation étant assez fine par rapport au rayon de courbure de Σ , des segments proches sont peu inclinés l'un par rapport à l'autre.

e) Calcul du potentiel, de la fonction de courant et des vitesses tangentielles

Pour un profil de N segments, l'équation (II-23) devient :

$$f(z) = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} e^{-i\beta_j} \left\{ (z_{j+1} - z) [\text{Log}(z - z_{j+1}) - 1] - (z_j - z) [\text{Log}(z - z_j) - 1] \right\}$$

$$f(z) = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} e^{-i\beta_j} \left\{ (z - z_j) \text{Log}(z - z_j) - (z - z_{j+1}) \text{Log}(z - z_{j+1}) \right\} + C \quad (\text{II-34})$$

Avec

$$C = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} e^{-i\beta_j} \{z_j - z_{j-1}\} = \sum_{j=1}^N -\frac{\sigma_j}{2\pi} l_j$$

Grâce à la relation (II-29), il vient

$$f(z) = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} \left\{ r_j e^{i\theta_j} [\text{Log } r_j + i(\beta_j + \theta_j)] - r_{j+1} e^{i\theta_{j+1}} [\text{Log } r_{j+1} + i(\beta_j + \theta_{j+1})] \right\} \quad (\text{II-35})$$

En néglige la constante additive C qui est indépendante du point z . Pour la même raison, la détermination précise des θ_j n'a aucune importance.

D'où, compte tenu de l'équation (II-30)

$$f(z) = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} \left\{ r_j e^{i\theta_j} \left[\text{Log} \frac{r_j}{r_{j+1}} + i(\theta_j - \theta_{j+1}) \right] + l_j (\text{Log}(r_{j+1}) + i\theta_{j+1}) \right\} \quad (\text{II-36})$$

En néglige la constante indépendante du point z .

Finalement, nous trouvons le potentiel des vitesses :

$$\varphi = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} \left\{ r_j \left[\cos(\theta_j) \operatorname{Log}\left(\frac{r_j}{r_{j+1}}\right) + \sin(\theta_j) (\theta_{j+1} - \theta_j) \right] + l_j \operatorname{Log}(r_{j+1}) \right\} \quad (\text{II-37})$$

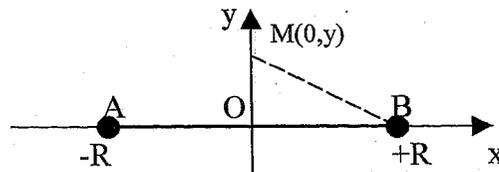
Et la fonction de courant

$$\psi = \sum_{j=1}^N \frac{\sigma_j}{2\pi} \left\{ r_j \left[\sin(\theta_j) \operatorname{Log}\left(\frac{r_j}{r_{j+1}}\right) + \cos(\theta_j) (\theta_j - \theta_{j+1}) \right] + l_j \theta_{j+1} \right\} \quad (\text{II-38})$$

La vitesse normale au point de contrôle par définition est $g(\tilde{z}_i)$, et la vitesse tangentielle est donnée par

$$T_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \sigma_j \quad (\text{II-39})$$

f) Segment portant une densité constante σ de source



Les points du segment auront pour ordonnée 0, et une abscisse comprise entre $-R$ et $+R$; Nous nous placerons en un point situé sur la médiatrice.

Point influençant : $P(\xi, \eta=0)$.

Point influencé : $M(x=0, y \neq 0)$. M_0 sera noté O .

Appliquant (II-11), multipliant par σ et intégrant en ξ de $-R$ à $+R$, nous trouvons :

$$\begin{aligned} \varphi(M) &= \frac{\sigma}{4\pi} \int_{\xi=-R}^{+R} \operatorname{Log}(y^2 + \xi^2) d\xi = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{\xi=0}^{+R} \operatorname{Log}(y^2 + \xi^2) d\xi \\ &= \frac{\sigma}{2\pi} \left\{ \left[\operatorname{Log}(y^2 + \xi^2) \cdot \xi \right]_0^R - \int_0^R \frac{2\xi d\xi}{y^2 + \xi^2} \right\} \\ &= \frac{\sigma}{2\pi} \left\{ R \operatorname{Log}(y^2 + R^2) - 2R + 2y \operatorname{Arctg}\left(\frac{R}{y}\right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{II-40})$$

Faisons maintenant tendre y vers zéro par valeurs positives (pour obtenir φ^+) ou négatives (pour obtenir φ^-). Il vient :

$$\varphi^+ = \varphi^- = \frac{\sigma}{\pi} (R \operatorname{Log}(R) - R) \quad (\text{II-41})$$

Calculons maintenant $\partial\varphi/\partial y$, pour $y \neq 0$:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial y} = \frac{\sigma}{2\pi} \left[\frac{R \ 2y}{y^2 + R^2} + 2 \operatorname{Arctg}\left(\frac{R}{y}\right) + 2y \frac{-R/y^2}{1 + R^2/y^2} \right] = \frac{\sigma}{\pi} \operatorname{Arctg}\left(\frac{R}{y}\right) \quad (\text{II-42})$$

D'où

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^+ = \frac{\sigma}{2}, \quad \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^- = -\frac{\sigma}{2} \quad (\text{II-43})$$

On remarque que le potentiel est continu à la traversée du segment portant les sources, mais la dérivée normale du potentiel est discontinue. Physiquement, la continuité du potentiel confirme la condition au limite de Neumann. La discontinuité et l'égalité en valeur absolue de la dérivée normale du potentiel, montre que le point de singularité représente physiquement une source si l'on voit de l'extérieur et un puits si l'on voit de l'intérieur.

g) Profil portant

Considérons le profil d'aile Σ présentant une pointe au bord de fuite F , et placée dans un écoulement uniforme de vitesse $(U_\infty, 0)$.

Notons tout d'abord que notre problème de Neumann extérieur devra être posé, non pas pour le potentiel total ϕ , qui n'est même pas borné à l'infini, mais pour le potentiel de perturbation φ , défini par

$$\phi = U_\infty x + \varphi(x, y) \quad (\text{II-44})$$

Où $U_\infty x$ est le potentiel de l'écoulement uniforme $(U_\infty, 0)$. φ tend vers zéro à l'infini.

La condition de *Kutta-Joukowski* impose à la ligne de courant quittant le profil en F de prendre une direction initiale comprise entre les prolongements du parois inférieure « intrados » et supérieure « extrados » du profil. Ainsi, tant que l'écoulement à l'intrados que l'écoulement à l'extrados, au voisinage de F , se font dans des angles inférieurs à π , nous aurons une vitesse nulle et non pas infinie en F .

Pour y assurer la condition de *K.J.* au bord de fuite, il faut figer un tourbillon approprié à l'intérieur. Il donne des vitesses plus fortes sur l'extrados que sur l'intrados, donc des pressions plus faibles et au total une circulation Γ .

Numériquement, aux N inconnues σ_j nous ajoutons Γ . La meilleure technique qui peut être employé, consiste à ajouter une densité constante γ de tourbillon sur tout le profil Σ . Pour cela il suffit, en (II-26) de remplacer σ_j par $\sigma_j - i\gamma$ pour tout les j . La circulation totale Γ est alors égale au produit de γ par la longueur totale de la courbe Σ discrétisée.

Rappelons que Le concept de tourbillon modélise ce qui se passe dans les mouvements tournants. Un fluide ne peut évidemment tourner en bloc jusqu'à l'infini. On observe dans la réalité que la rotation est essentiellement concentrée dans un noyau central, et qu'elle devient rapidement négligeable à l'extérieur (bien que le fluide y tourne aussi). On concentrant alors ce noyau à l'origine qui devient point singulier, on constate que l'on peut également construire un champ de ce type qui soit incompressible et irrotationnel partout à l'extérieur. On obtient ainsi le *tourbillon ponctuel plan* (Fig.II.4).

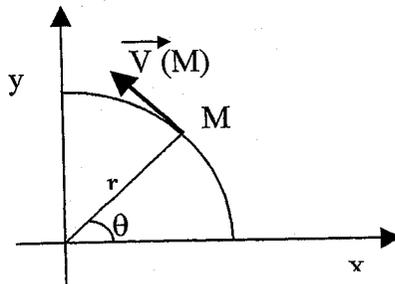


Fig.II.4 : Représentation d'un tourbillon à 2D

On postule donc ici que le champ induit par le tourbillon est en tout point purement circulaire ; c'est à dire que ces lignes de courant sont les cercles centrés à l'origine. Le module de la vitesse doit là encore décroître comme $1/r$, mais cette fois pour que l'irrotationnalité soit assurée, et qu'il ne doit pas non plus dépendre de θ pour qu'il y ait incompressibilité . Ainsi :

$$\vec{V} = \begin{cases} V_r=0 \\ V_\theta=\frac{C}{r} \end{cases}, \quad \vec{V} = \begin{cases} V_x=-\frac{C}{r}\sin\theta \\ V_y=\frac{C}{r}\cos\theta \end{cases} \tag{II-45}$$

Ou encore, vectoriellement :

$$\vec{V}(M)=\vec{C} \wedge \frac{\vec{R}}{r^2} \tag{II-46}$$

Par comparaison avec le cas de la source (§ II.3.2.(a)), on constate que l'intensité \bar{C} du tourbillon est vectorielle, et intervient par un produit vectoriel. Il faut effectivement un vecteur normal au plan pour rendre compte d'un champ circonférentiel dans le plan. La lettre C choisie évoque la circulation : on trouve sur n'importe quelle courbe fermée entourant le tourbillon la circulation $2\pi C$ (2π fois l'intensité).

Si on compte la circulation par référence à un point du demi-axe $x > 0$, et le débit par référence à un point de cercle de rayon 1 on obtient pour potentiel et fonction de courant du tourbillon ponctuel plan :

$$\varphi = -C \theta \quad , \quad \psi = C \operatorname{Log}(r) \quad (\text{II-47})$$

d'où la vitesse complexe de la relation (II-26) devient

$$(u - i v)_i = \frac{\sigma_j - i \gamma}{2\pi} e^{i(\beta_i - \beta_j)} \operatorname{Log} \frac{\tilde{z}_i - z_j}{\tilde{z}_i - z_{j+1}} \quad (\text{II-48})$$

Conclusion :

Le calcul des éléments de la matrice (appeler "coefficients d'influence A_{ij} "), nous permettra de calculer la vitesse tangentielle à chaque point de collocation et par conséquent la pression à chaque point par la relation suivante :

$$C_{pi} = 1 - \frac{u_{ii}^2}{v_0^2} \quad (\text{II-49})$$

II.4 Le coefficient de portance C_L

Une pale subit une force lorsqu'elle est plongée dans un flux d'air, dû au comportement des filets d'air à proximité. Cette force peut être décomposée en deux composantes, l'une verticale (la Portance, F_L) et l'autre horizontale (la Traînée, F_D). Ces forces dépendent évidemment de l'angle que fait la pale avec la direction du vent, appelé angle d'attaque (α).

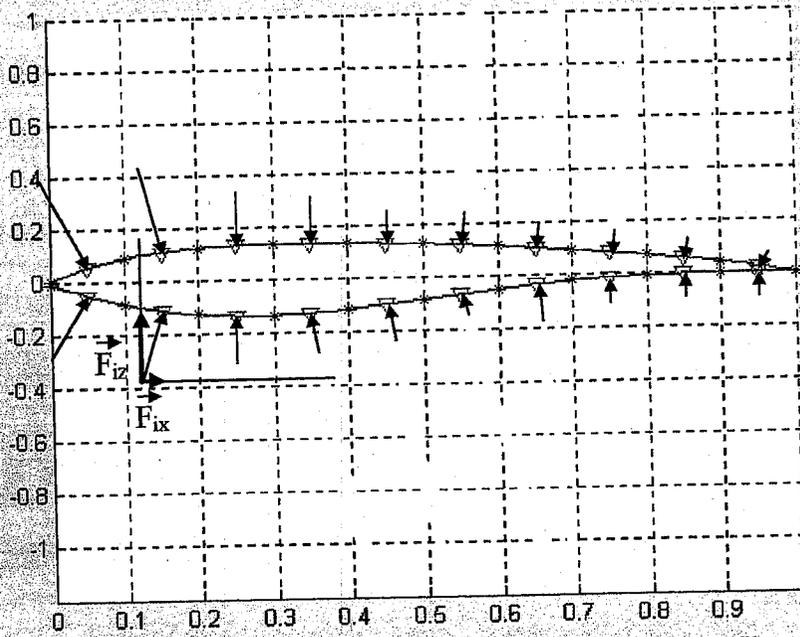


Fig.II-05 : La distribution des contraintes autour du profil.

La force appliquée à chaque segment $[z_i, z_j]$ est :

$$\vec{F}_i = P_i \vec{S}_i = C_{L_i} \cdot P \vec{S}_i \tag{II-50}$$

P_i : La pression à chaque segment $[z_i, z_j]$;

S_i : La surface élémentaire.

La force de portance et la force de traînée sont généralement déterminées de façon expérimentale. Elles sont exprimées par les relations ci dessous :

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L \tag{II-51}$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D \tag{II-52}$$

C_L : Coefficient de portance.

C_D : Coefficient de traînée.

A partir de la relation (II-51) et la relation (II-52), on calcule les forces de poussée axiale dFa et tangentielle dFt agissant sur un élément de pale :

$$dFa = \frac{\rho \cdot S}{2} V^2 (C_L(\alpha) \cos(\theta) + C_D(\alpha) \sin(\theta)) \tag{II-53}$$

$$dFt = \frac{\rho \cdot S}{2} V^2 (C_L(\alpha) \sin(\theta) - C_D(\alpha) \cos(\theta)) \tag{II-54}$$

La somme des intégrales sur toutes les pales, des composantes horizontales et verticales des forces des portances et de traînée, permet le calcul de la force de poussée axiale et du couple aérodynamique (couple capté par la turbine). Ainsi ces expressions sont les suivantes :

$$Fa = \sum_{k=1}^{Np} \int_{Rm}^R dFa(r) dr \quad (\text{II-55})$$

$$\Gamma = \sum_{k=1}^{Np} \int_{Rm}^R r dFt(r) dr \quad (\text{II-56})$$

Np est le nombre de pales, R est le rayon de l'aéroturbine et R_m est la distance du centre du moyeu au coin de la pale côté moyeu.

La force axiale est importante à connaître pour calculer les efforts subis par les pales et la tour. L'étude de ces efforts ne fait néanmoins pas partie des objectifs de cette thèse.

On voit d'après les équations précédentes, qu'en dehors des caractéristiques techniques de la pale (type de profil et dimensions) le couple aérodynamique dépend du module de la vitesse du vent, de l'angle d'incidence α et de l'angle d'attaque α_i . L'angle d'incidence est fonction de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent incident sur le rotor alors que l'angle d'attaque est fonction, en plus de ces deux vitesses, de l'angle de calage des pales. Le couple relève par conséquent de la vitesse du vent incident sur la turbine, en plus de l'angle de calage et de la vitesse de rotation, tous deux donnés par la stratégie de commande du système : $\Gamma = f(\beta, \Omega, V_e)$ [11].

II.5 Conclusion

La distribution de pression autour du profil représente une phase très importante de notre travail. Grâce au principe de la méthode des singularités qui considère que le flux est produit par ces singularités, nous sommes arrivés à modéliser ce phénomène de distribution de pression autour du profil.

Notre but est non seulement la modélisation mais encore la détermination de la distribution de pression de n'importe quel profil. Le calcul de ces différentes pressions, nous amène à résoudre un système des équations énormes qui dépendent essentiellement du nombre des points de singularités. La meilleure solution de résoudre ce problème est d'utiliser le calcul numérique.

CHAPITRE III
MODELE DE SIMULATION

Modèle de simulation

La détermination de la distribution de pression autour de profil introduite au chapitre II, nous permettra de calculer le coefficient de portance des pales et par la suite la détermination de la vitesse de rotation de l'hélice et la puissance mécanique captée par cette dernière. Pour cette raison, dans ce chapitre, nous allons essayer de construire un modèle général de simulation adapté à l'ensemble des éléments du capteur.

III.1 Moment d'inertie de l'hélice

On cherche à déterminer le moment d'inertie de l'hélice par rapport à son axe de rotation.

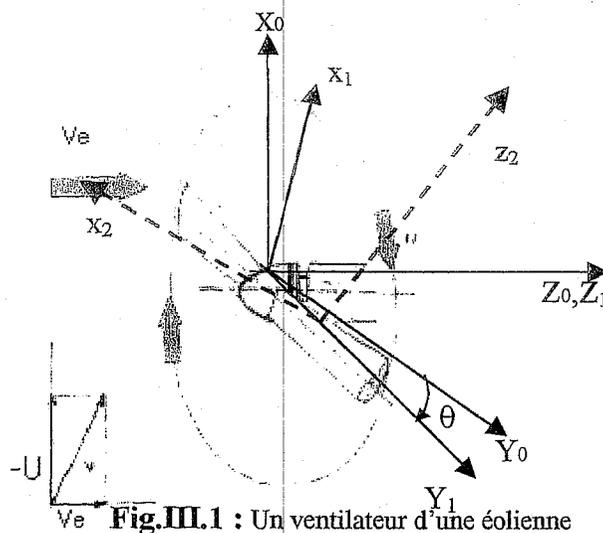
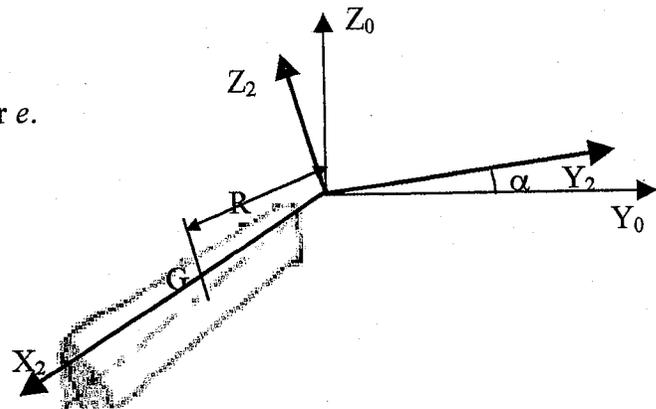


Fig.III.1 : Un ventilateur d'une éolienne

Le schéma ci-contre (*Fig.III.1*) représente un capteur éolien constitué d'un moteur dont le stator est lié au bâti θ et d'une hélice I à trois pales. Soit (O, X_0, Y_0, Z_0) un repère lié au bâti θ . Soit (O, X_1, Y_1, Z_1) un repère lié au l'hélice I . L'hélice est en liaison pivot d'axe (O, Z_0) avec le moteur. On pose $\theta = (Y_0, Y_1)$ avec θ variable. Soit $R_2(o, \bar{x}_2, \bar{y}_2, \bar{z}_2)$ un repère lié à une pale. On pose $\alpha = (\bar{z}_1, \bar{z}_2)$ avec α constante.

Chaque pale a les caractéristiques suivantes (voir figure ci-contre) :

- La masse m .
- La corde c , longueur h , épaisseur e .
- Centre d'inertie G .



Le rotor du moteur fixé à l'hélice est caractérisé par son moment d'inertie par rapport à l'axe \overline{ozo} .

La relation fondamentale de la dynamique du solide en rotation est régit par l'équation :

$$\sum M = J \ddot{\alpha} \tag{III-1}$$

Le centre de masse G d'un solide est défini par:

$$\overline{OG} = \frac{\int \overline{OA} \, dm}{\int dm} = \begin{cases} X_G = \frac{\int x \, dm}{\int dm} \\ Y_G = \frac{\int y \, dm}{\int dm} \\ Z_G = \frac{\int z \, dm}{\int dm} \end{cases} = \begin{cases} X_G = \frac{\int x \, \rho \, dV}{\int \rho \, dV} \\ Y_G = \frac{\int y \, \rho \, dV}{\int \rho \, dV} \\ Z_G = \frac{\int z \, \rho \, dV}{\int \rho \, dV} \end{cases} \tag{III-2}$$

Où dV est l'élément de volume ($dV = dx \, dy \, dz$).

Calculons le moment d'inertie d'une pale par rapport aux plans $(G, \bar{x}_2, \bar{y}_2)$ $(G, \bar{y}_2, \bar{z}_2)$ $(G, \bar{z}_2, \bar{x}_2)$:

$$\begin{aligned} I_{Gxy}(P) &= \int z^2 \, dm = \iiint [z]^2 \, \rho \, dx \, dy(x) \, dz \\ I_{Gyz}(P) &= \int x^2 \, dm = \iiint [x]^2 \, \rho \, dx \, dy(x) \, dz \\ I_{Gxz}(P) &= \int y^2 \, dm = \iiint [y(x)]^2 \, \rho \, dx \, dy(x) \, dz \end{aligned} \tag{III-3}$$

Le tenseur d'inertie du pale dans le repère $(G, \bar{x}_2, \bar{y}_2, \bar{z}_2)$ est défini par :

$$J_G = \begin{vmatrix} I_{Gx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{Gy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{Gz} \end{vmatrix}$$

$$I_{Gx} = I_{xy} + I_{zx} = \iiint [z]^2 \rho \, dx \, dy(x) \, dz + \iiint [y(x)]^2 \rho \, dx \, dy(x) \, dz$$

$$I_{Gy} = I_{xy} + I_{yz} = \iiint [z]^2 \rho \, dx \, dy(x) \, dz + \iiint [x^2] \rho \, dx \, dy(x) \, dz$$

\bar{oz} est un axe de révolution donc il représente un axe principale d'inertie. D'où le tenseur d'inertie devient :

$$J_G = \begin{vmatrix} I_{Gx} & -I_{xy} & 0 \\ -I_{xy} & I_{Gy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{Gz} \end{vmatrix}$$

Le moment d'inertie en point O est donnée par le théorème de Huygens :

$$I_{OB} = I_{GB} + M \overline{OG} \wedge \bar{B} \wedge \overline{OG}$$

avec $B = x_2, y_2, z_2$.

La dernière matrice s'obtient en remplaçant B par x_2, y_2, z_2 dans $M \overline{OG} \wedge \bar{B} \wedge \overline{OG}$ et en disposant le tout en colonne. De cette façon, on trouve :

$$I_O[\text{pale}] = I_G[\text{pale}] + M \begin{bmatrix} R^2 & 0 & 0 \\ 0 & R^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ car } \overline{OG} = R \bar{x}_2$$

Pour une hélice qui a trois pales le tenseur d'inertie est :

$$J_G = 3 \begin{vmatrix} I_{Gx} + M.R^2 & -I_{xy} & 0 \\ -I_{xy} & I_{Gy} + M.R^2 & 0 \\ 0 & 0 & I_{Gz} \end{vmatrix} \quad (\text{III-4})$$

Notons que le tenseur d'inertie est exprimé dans la base $R_2(o, \bar{x}_2, \bar{y}_2, \bar{z}_2)$.

Tout le problème se résume donc à déterminer un moment d'inertie en un point à partir de la matrice d'inertie en ce même point.

$$\begin{aligned} [I_{Ox_0}]_{R_2} &= [x_0]_{R_2} \cdot [J]_{R_2} \cdot [x_0]_{R_2} \\ [I_{Ox_0}]_{R_2} &= \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix}_{R_2} \cdot \begin{bmatrix} I_{Gx} + M.R^2 & -I_{xy} & 0 \\ -I_{xy} & I_{Gy} + M.R^2 & 0 \\ 0 & 0 & I_{Gz} \end{bmatrix}_{R_2} \cdot \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix}_{R_2} \\ &= (I_{Gx} + M.R^2) \sin^2(\alpha) + (I_{Gy} + M.R^2) \cos^2(\alpha) - 2.I_{xy} \cos(\alpha) \sin(\alpha) \end{aligned}$$

La relation fondamentale de la dynamique devient :

$$\overline{OG} \wedge \vec{F} = [J] \begin{vmatrix} \ddot{\alpha} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = [I_{oxo}] \ddot{\alpha} \quad (\text{III-5})$$

La force \vec{F} exercée par le vent sur une pale est toujours perpendiculaire à \overline{OG} .

d'où l'équation devient :

$$\begin{vmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ F \\ 0 \end{vmatrix} = R \cdot F = [I_{oxo}] \ddot{\alpha} \quad (\text{III-6})$$

Revenons maintenant au mouvement de l'hélice. La pale à l'instant $t=0$ subit des forces sur la surface intrados et extrados due au vent. Lors du démarrage, il y a une naissance de la force résistante de l'air qui est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'hélice.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 S_{ex}$$

Donc l'équation de mouvement :

$$R \cdot (F - F_a) = [I_{oxo}] \ddot{\alpha}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{R \left(F - \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2 S_{ex} \right)}{[I_{oxo}]} \quad (\text{III-7})$$

Le calcul du moment d'inertie de l'hélice est par conséquent la vitesse de rotation est possible si et seulement si on connaît la fonction qui décrit le profil des pales.

Grâce au code *TracFoil* et au code *Snack* "Super Numerical Airfoil Creation Kit", qui contient la majorité des profils de pales et par fittage à l'aide des logiciels Origine5.0 et Matlab6p5, nous avons pu déterminer une fonction qui a la forme quasi polynomiale et qui peut être adapter à ces profils :

$$y = P1 \left(P2 \sqrt{x} + P3 x + P4 x^2 + P5 x^3 + P6 x^4 \right) \quad (\text{III-8})$$

$P1, P2, P3, P4, P5$ et $P6$ se sont des paramètres variables avec les profils.

A l'unité de recherche matériaux et énergies renouvelables de Tlemcen (URMER), nous avons mis au point un programme d'analyse des éoliennes intitulé PAE(URMER). Permettant le tracé des profils de pales [20],[Annexe03].

La représentation des profils par *TracFoil* et *Snack* point par point et le tracé par *PAE* défini à partir de l'Eq.III.8 est :

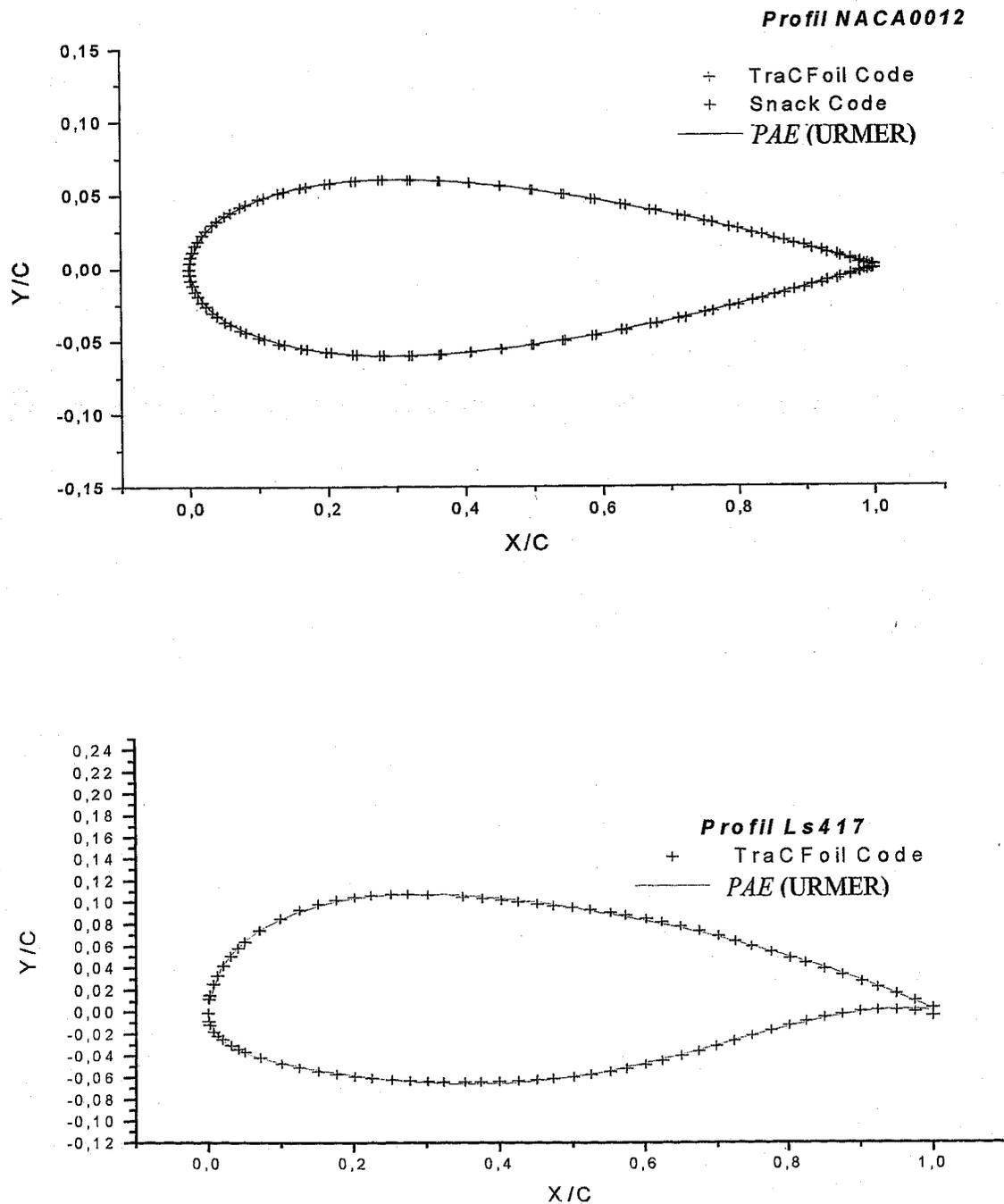


Fig.III.2 : Vérification du profil obtenu par la relation III.8

La Fig.III.2 compare la forme du profil qui est décrite par l'équation III.8 et la forme qui est donné par les autres codes de traçage. On remarque très bien la fidélité de cette équation.

III.2 Représentation simplifiée

On propose ici une méthode de simulation de l'interaction vent-aéroturbine, en se basant sur la théorie du disque actuateur. Cette théorie suppose que le vent incident sur le rotor est homogène [11].

III.2.1 Théorie du disque actuateur

Cette théorie explique très simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent, en se basant sur des bilans énergétiques et l'application de l'équation de Bernoulli. Le rotor éolien captant l'énergie est perçu comme un disque poreux qui provoque une diminution de la quantité de mouvement d'un courant d'air, donnant lieu à un saut de pression dans les faces du disque et à une déflexion du courant en aval [12].

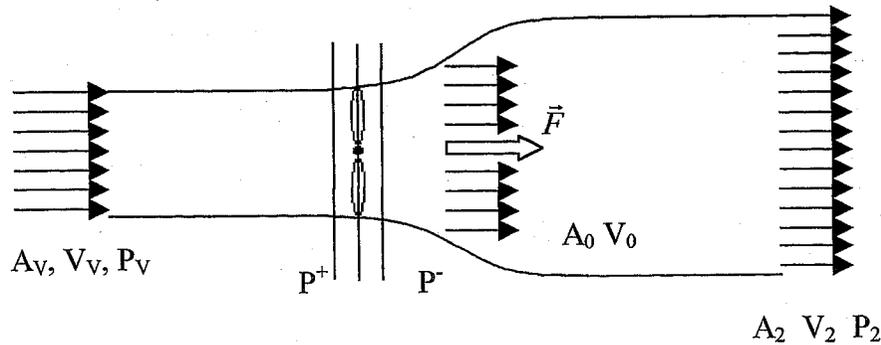


Fig.III.3 Tube de courant de vent.

La théorie de la quantité de mouvement est utilisable pour étudier le comportement de l'aéroturbine à condition de faire certaines hypothèses. Les hypothèses principales sont que l'air est incompressible, que le mouvement du fluide est stationnaire et que les grandeurs étudiées ont la même valeur sur une section donnée du tube de courant d'air.

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique dans le vent traversant, à une vitesse V_V , une surface A_V , s'exprime par :

$$P_V = \frac{1}{2} \rho A_V V_V^3 \quad (\text{III-9})$$

Où ρ est la densité de l'air.

L'aéroturbine ne peut récupérer qu'une partie de cette puissance :

$$P_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_V^3 C_{PW} \quad (\text{III.10})$$

où R est le rayon de l'aéroturbine. C_{PW} est le coefficient de puissance : un paramètre sans dimension qui exprime l'efficacité de l'aéroturbine dans la transformation de l'énergie

cinétique du vent en énergie mécanique. Pour une aéro turbine donnée, ce coefficient est fonction de la vitesse du vent, l'angle de calage et la vitesse de rotation de l'aéro turbine.

C_P est en fait souvent donné en fonction de l'angle de calage et la vitesse spécifique λ , définie par :

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V_V} \quad (\text{III-11})$$

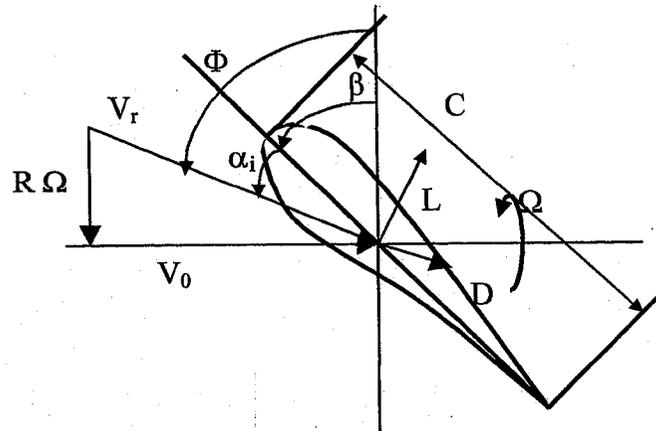


Fig.III.4 : Diagramme de vitesse et des forces sur un profil aérodynamique

La valeur théorique maximale de C_{PW} est donnée par la limite de Betz [13] :

$$C_{P_theo_max} = 0.593 = 59.3 \%$$

Ici, on s'intéresse plutôt au transfert du couple. Ce dernier s'obtient à partir de la puissance captée et la vitesse de rotation de la turbine :

$$\Gamma = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{\rho \pi R^2 V_V^3}{2 \Omega} C_{PW} = \frac{\rho \pi R^3 V_V^2}{2 \lambda} C_{PW} = \frac{\rho \pi R^3 V_V^2}{2} C_\Gamma \quad (\text{III-12})$$

Les coefficients de puissances et de couple sont liés par la relation :

$$C_{PW}(\lambda) = \lambda C_\Gamma(\lambda) \quad (\text{III-13})$$

L'utilisation du modèle résultant de la théorie de la quantité de mouvement exige la connaissance de l'expression de $C_{PW}(\lambda, \alpha)$ et de $C_\Gamma(\lambda, \alpha)$. Ces expressions dépendent essentiellement des caractéristiques géométriques des pales. Celles-ci notamment conçues en fonction des caractéristiques d'un site, de la puissance nominale souhaitée et du type de régulation (pitch ou stall) et de fonctionnement (vitesse variable ou fixe) de l'aérogénérateur.

Des algorithmes permettent de calculer selon ces objectifs, la forme et les dimensions des pales. Ces algorithmes donnent lieu de plus à des courbes exprimant C_{PW} et C_Γ en fonction de λ et β [14,15].

Une autre manière d'obtenir ces courbes peut être la réalisation d'essai en soufflerie. Il suffit de mesurer la vitesse du vent incident, la vitesse de rotation de l'aéroturbine, l'angle de calage et la puissance produite pour différentes conditions d'opération.

Connaissant les paramètres du modèle basé sur la théorie de l'élément de pale, il est également possible de retrouver les courbes $C_{Pw}(\lambda, \beta)$ et $C_T(\lambda, \beta)$. En effet, en égalant l'expression du couple obtenu par les deux méthodes (II-69) et (III-12), on a :

$$\Gamma = \frac{\rho \pi R^3 V_e^2}{2} C_T = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_{in}}^R \frac{\rho C}{2} V_e^2 (C_L(\alpha_i) \sin(\Phi) - C_D(\alpha_i) \cos(\Phi)) dr \quad (\text{III-14})$$

Compte tenu des hypothèses utilisées pour la théorie du disque actuateur, la vitesse incidente sur la surface du rotor, V_0 , est la même sur toute la surface. De plus on suppose ici que cette vitesse est égale à la vitesse en amont V_e . Compte tenu de ces suppositions, la vitesse relative peut s'exprimer en fonction de la vitesse du vent V_e et de la vitesse spécifique λ :

$$V_r^2 = V_0^2 + (r \Omega)^2 = V_0^2 \left(1 + \left(\frac{R r \Omega}{R V_0} \right)^2 \right) = V_0^2 \left(1 + \left(\frac{r \lambda}{R} \right)^2 \right) \quad (\text{III-15})$$

L'angle d'incidence dépend également de la vitesse spécifique :

$$\cos(\Phi) = \frac{r \Omega}{V_r} = \frac{R r \Omega}{V_0 R \sqrt{1 + \left(\frac{r \lambda}{R} \right)^2}} = \frac{\frac{r \lambda}{R}}{\sqrt{1 + \left(\frac{r \lambda}{R} \right)^2}} \quad \sin(\Phi) = \frac{V_0}{V_r} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r \lambda}{R} \right)^2}}$$

$$\text{d'où :} \quad \Phi = \arctan\left(\frac{R}{r \lambda}\right) \quad (\text{III-16})$$

Et l'angle d'attaque vaut $\Phi - \beta$ (Fig. III.4).

On voit qu'à partir des deux expressions du couple (III-14), C_T peut-être calculé pour des valeurs de λ et β fixées. Il est logique que les deux expressions du couple dépendent toutes les deux de λ et β puisque même si les méthodes sont différentes, elles décrivent toutes les deux le même phénomène physique.

III.3. Couplage mécanique

La représentation mécanique de l'aéroturbine entière est complexe. Les éléments mécaniques d'une aéroturbine et les forces subies ou transmises à travers ses composants sont très nombreux. Il faut par conséquent faire un choix des éléments et des grandeurs de ces éléments que l'on veut représenter.

Ce qui doit être modéliser ici c'est la transmission du couple et de la puissance captée par le rotor éolien. C'est à dire le comportement du train de puissance. Le train de transmission de puissance est constitué de pales reliées au moyeu, couplées à l'arbre lent, relié à son tour au multiplicateur qui multiplie la vitesse de rotation de l'arbre rapide et couplé au générateur.

On peut classer la conception des aérogénérateurs en deux grandes familles :

- Les systèmes rigides où on cherche à ce que les fréquences naturelles des éléments de transmission soit supérieures aux fréquences des forces agissant sur l'aéroturbine.
- Les systèmes flexibles où ces fréquences naturelles sont inférieures à celles des forces excitant le système mécanique.

Les aérogénérateurs modernes utilisent plutôt le 2^{ème} type de système dans le but d'augmenter leur longévité. En effet, ce type de système amortit les charges mécaniques appliquées sur les différents composants des éoliennes.

Certains auteurs modélisent la transmission de puissance dans le train de puissance par un modèle linéaire à six masses ou inerties, couplées les unes aux autres [16,17,18]. Trois masses représentent les pales et les trois autres désignent le moyeu, le multiplicateur et le générateur. Les couplages flexibles entre les masses sont définis par leur constante de rigidité et d'amortissement ; Ces modèles prennent de plus en compte les pertes par frottements de chacune des masses dans leur rotation.

C'est la première fréquence de résonance du train de puissance que l'on veut représenter ici. La deuxième est normalement plus amortie et a une fréquence bien plus élevée. Pour représenter cette première fréquence de résonance, un modèle à deux masses suffit, celui-ci est illustré dans la *Fig.III.6*.

Toutes les grandeurs sont ramenées à l'axe de grande vitesse. L'inertie J_t se rapporte aux masses du côté de la turbine tandis que J_m désigne les masses du côté de la machine électrique. Le couplage flexible entre les inerties J_t et J_m est défini par des coefficients de rigidité et d'amortissement K_{tm} et D_{tm} . Comme pour les inerties, ces paramètres ne sont pas directement liés à l'axe rapide. Les coefficients de frottement D_t et D_m représentent les pertes mécaniques par frottement dans le mouvement de rotation de tous les éléments.

Tous ces paramètres ne sont pas directement liés à l'ensemble des éléments du train de puissance, mais à ce modèle à deux masses, qui exprime le mode principale de comportement dynamique de train de puissance.

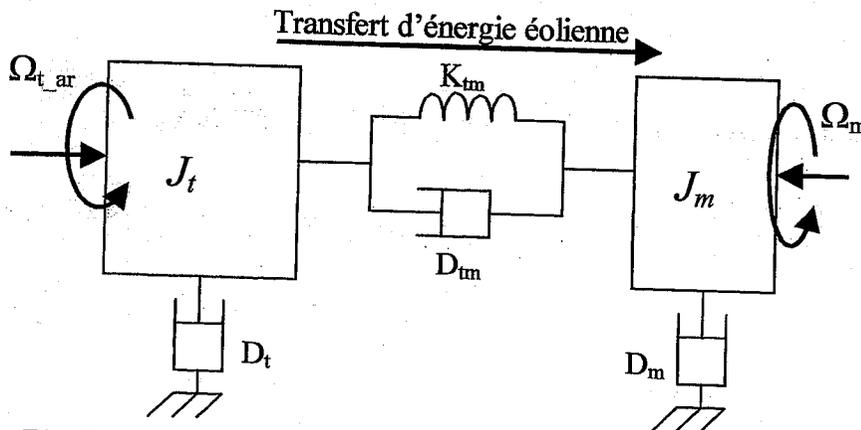


Fig.III.6 : Couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine électrique

Comme on a déjà précisé, toutes les variables du côté de la turbine sont ramenées à l'axe rapide. Cela signifie que :

$$\begin{cases} \Omega_{t_ar} = N \Omega_t \\ T_{t_ar} = \frac{T_t}{N} \end{cases} \quad \text{(III-17)}$$

Où N est le rapport de multiplication du multiplicateur.

Le couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine électrique est ainsi modélisé par trois équations différentielles linéaires :

$$\begin{cases} J_t \frac{d\Omega_{t_ar}}{dt} = T_{t_ar} - D_t \Omega_{t_ar} - T_{mec} \\ J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = T_{em} - D_m \Omega_m + T_{mec} \\ \frac{dT_{mec}}{dt} = K_{tm} (\Omega_{t_ar} - \Omega_m) + D_{tm} \left(\frac{d\Omega_{t_ar}}{dt} - \frac{d\Omega_m}{dt} \right) \end{cases} \quad \text{(III-18)}$$

III.4. Vent incident sur la turbine éolienne

Le vent à modéliser pour le calcul du couple capté par l'aéroturbine (équation III-14) est fictif. C'est un vent exprimé en un point de l'aire balayée par l'aéroturbine, mais ce vent doit permettre de retrouver un couple T proche de celui que produirait le champ de vitesse du vent réel incident sur toute l'aire balayée par le rotor. La prochaine section explique les divers éléments intervenant dans la génération de cette vitesse du vent.

III.4.1. Effet d'ombre de tour de cisaillement du vent

Les effets d'ombre de la tour et celui de cisaillement du vent dépendent de la position angulaire des pales. Ainsi, afin de modéliser ces effets, il faut simuler le vent incident sur chaque pale.

On calcule la vitesse du vent incident sur chaque pale comme la superposition de la vitesse du vent fictif à la hauteur du moyeu, corrigé de l'incrément ou du décrétement de vitesse dû au cisaillement du vent et à l'effet d'ombre de la tour :

$$V_{pi}(\varphi_{pi}, r) = V_m (1 + \Delta C(r, \varphi_{pi}) - \Delta OT(r, \varphi_{pi})) \quad (\text{III-19})$$

Où :

- φ_{pi} : est la position angulaire de la pale pi .
- I : est le numéro de la pale.
- r : est la position radiale dans la pale.
- V_m : est la vitesse du vent fictif à la hauteur du moyeu.
- ΔC : représente l'incrément ou le décrétement de vitesse dû au cisaillement du vent.
- ΔOT : est lié au décrétement de la vitesse de vent dû à l'effet d'ombre de la tour.

ΔC dépend du rayon r de la pale où on fait les calculs. La position typique considérée pour les calculs est le centre de poussée $r = 0.75 R$ [11], et c'est donc à cet endroit que le vent est calculé.

Une fois la vitesse du vent incident sur chaque pale est obtenue, le couple capté par chaque pale est donné par :

$$T_{pi} = \left(\frac{\pi \rho R^3}{2 N_p} \right) V_{pi}^2 \left(\frac{C_{pw}(\lambda_{pi}, \beta_{pi})}{\lambda_{pi}} \right) \quad (\text{III-20})$$

Où :

$$\lambda_{pi} = \frac{0.75 \Omega R}{V_{pi}}$$

N_p : étant le nombre de pales.

Le décrétement de vitesse dû à l'effet d'ombre s'exprime [19] :

$$\Delta OT(\varphi_{pi}) = t_0 + t_p \cos\left(\frac{k_{tour} \pi}{\varphi_{pi}} (\varphi_{pi} - \varphi^*)\right) \quad \varphi_{pi} \in [\varphi^* - \varphi_{ot}, \varphi^* + \varphi_{ot}] \quad (\text{III-21})$$

Où les paramètres t_0 , t_p et φ_{ot} sont choisis de sorte à reproduire l'influence de la tour sur le vent incident sur la turbine.

- φ_{pi} est la position de la pale dans le système de référence considéré.
- φ_{ot} est l'angle de l'influence de la tour.
- φ^* est l'angle de position de la tour pour le système de référence choisi.
- t_0 , t_p sont des paramètres empiriques.
- k_{tour} est le paramètre qui définit le type de tour ($k_{tour} = 1$ pour tour tubulaire).

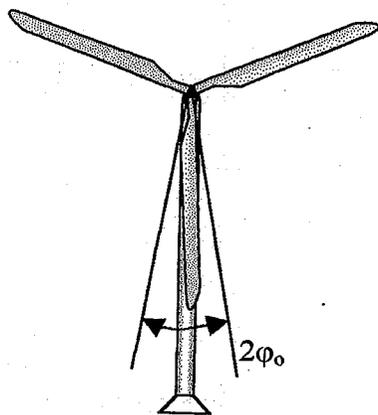


Fig.III.7 : Effet d'ombre de la tour

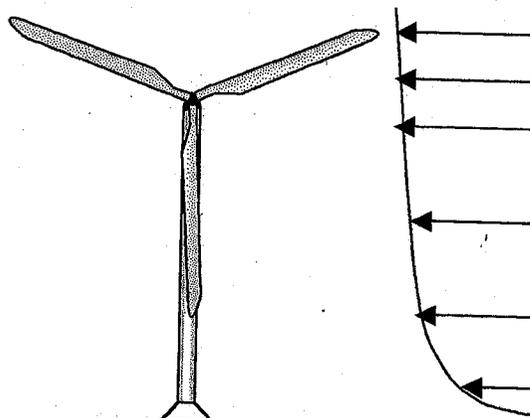


Fig.III.8 : Cisaillement du vent

Le cisaillement du vent est modélisé par la loi potentielle :

$$\Delta C(\varphi_{pi}) = \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha = \left(\frac{0.75 R \sin(\varphi_{pi}) + H}{H}\right)^\alpha \quad (\text{III-22})$$

- H : est la hauteur de moyeu de l'aérogénérateur.
- $0.75 R$: est la distance du centre de poussée de la pale à l'axe de rotation.
- Z : est la hauteur.
- φ_{pi} : est la position de la pale dans le système de référence considéré.

Une expression plus simple est obtenue en développant la précédente en série de Taylor [19] :

$$\Delta C(\varphi_{pi}) = \alpha \left(\frac{0.75 R}{H}\right) \sin(\varphi_{pi}) + \frac{\alpha(\alpha - 1)}{2} \left(\frac{0.75 R}{H}\right)^2 \sin^2(\varphi_{pi}) \quad (\text{III-23})$$

III.4.2. Couple capté par la turbine

Le couple total capté par l'aéroturbine est donné par la somme du couple capté par chaque pale.

$$Tt(s) = \sum_{pi=1}^{Np} T_{pi}(s) \quad (\text{III-24})$$

III.4.3. Eléments non considérés

Il y a d'autres éléments qui interviennent dans l'interaction vent-aéroturbine. Ici, on décide de ne pas prendre en compte les éléments suivants :

- Filtre spatiale : Il s'agit du retard des vitesses induites dans le sillage du rotor éolien quand un changement se produit au niveau de la vitesse du vent incident, de la vitesse de rotation de l'aéroturbine ou de l'angle de calage. La masse d'air du sillage a besoin d'un certain temps pour s'adapter à la nouvelle situation [16].
- Rafales : Les rafales en une influence importante sur la conception de la commande d'aérogénérateur. Ce sont ces perturbations qui imposent, dans certaines zones de fonctionnement, la bande passante des régulateurs et les limites à la sortie de ces régulateurs.

Une rafale est définie par une magnitude, une durée et une fonction liée à sa forme [16]. La magnitude donne la déviation maximale par rapport à la valeur moyenne de la vitesse du vent. La durée exprime le temps pendant lequel la vitesse du vent diffère de celle de sa valeur moyenne. La fonction liée à la forme et qui définit le taux de croissance de la vitesse du vent est :

$$Vv(t) = U + 0.5 \Delta V \left[1 - \cos\left(\frac{2 \pi t}{\tau}\right) \right]$$

ΔV étant la magnitude de la rafale

t le temps écoulé depuis le début de la rafale.

τ est la durée ou la période.

III.5. Modélisation du capteur

Dans le chapitre précédant, nous avons étudié théoriquement l'écoulement autour d'une pale d'une hélice basant sur le théorème des potentiels complexe résolue par la méthode des singularités. Dans ce qui suit nous essayons de modéliser ce problème pour que nous puissions le simuler après par le logiciel MATLAB.

La première étape dans cette modélisation est la connaissance de la forme géométrique du profil de la pale. Soit par une forme analytique, une fonction $y=f(x)$ qui décrit la forme de pale. Ou seulement par la connaissance des coordonnées d'un certain nombre de points qui appartient au profil qui nous permet de déterminer la meilleure fonction analytique qui décrit le profil.

III.5.1 Profil

Un profil est généralement décrit comme une section transversale bidimensionnelle d'une aile. Les profils sont utilisés pour deux raisons: pour créer la force de portance ou réduire la force de traîné. Il y a plusieurs type de profils qui sont publiés , parmi ces types de profils il y a une catégorie très connue en aéronautique c'est le profil *NACA*.

Le mot *NACA*, est une abréviation pour le Comité consultatif national pour l'aéronautique en USA (National Advisory Committee for Aeronautics). Officiellement, le *NACA* a été créé en 1915, pour la surveillance et la direction de l'étude scientifique des problèmes du vol. Le *NACA* était un groupe de scientifiques et d'ingénieurs qui ont étudié des problèmes communs au champ de l'aéronautique. Les profils *NACA* se divisent en plusieurs groupes, par exemple le *NACA 4-digit*, *NACA 5-digit*, *NACA 16 series* .

Les profils les plus rencontrés dans le *NACA 4-digit* sont-les : *NACA0009*, *NACA0012*, *NACA0015* et *NACA4412*.

a) NACA 4-digit

- *Le premier chiffre* : représente la hauteur maximum de la ligne de cambrure exprimée en pourcentage par rapport à la longueur de corde de la pale.
- *Le deuxième chiffre* : L'endroit horizontal de la hauteur maximum de ligne de cambrure dans les dixièmes de la longueur de corde.

➤ Les deux derniers chiffres combinés : L'épaisseur maximum de la pale exprimée en pourcentage de la longueur de corde.

Par exemple, si nous utilisons l'aile de NACA 2412 que l'on trouve très souvent sur la plupart des avions légers. Le premier chiffre 2 (*par(1)*), vous indique que la ligne de cambrure est cintrée jusqu'à une taille égale à 2% de la longueur de corde. Le deuxième chiffre 4 (*par(2)*), nous indique que la cambrure maximum se produit approximativement à 40% de la longueur de corde. Les deux derniers chiffres (*par(3)*) indiquent que la pièce la plus épaisse de l'aile est environ 12% de la longueur de corde. Puisque c'est une série à 4 chiffres de NACA, l'épaisseur maximum se produit à environ 30% de la corde.

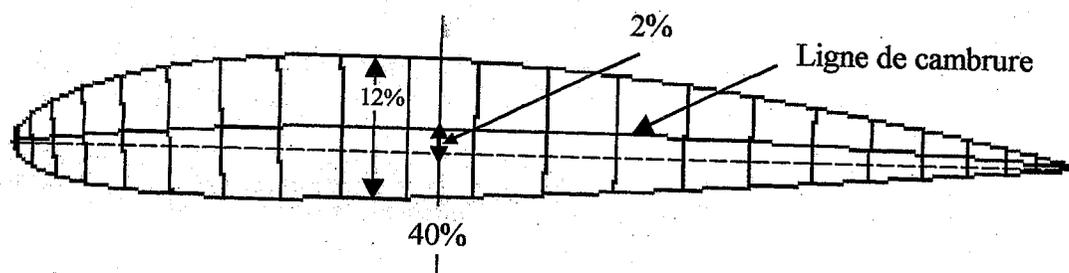


Fig.III.9: Profil NACA2412

En réalité tous les profils de *NACA 4-digit* sont à l'origine d'un profil symétrique qui est modifié après, par les trois paramètres *par(1) par(2) par(3)* (Fig.III.9). La fonction qui décrit ce profil est :

$$y(x) = \begin{cases} 5 \text{ Par}(3) c \left(0.2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.126 \frac{x}{c} - 0.3537 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right) \\ - 5 \text{ Par}(3) c \left(0.2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.126 \frac{x}{c} - 0.3537 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right) \end{cases} \quad \text{(III-25)}$$

c: La corde;

Pour tracer les différents profils de *NACA 4-digit* à partir du profil symétrique en MATLAB, il est conseillé de suivre la démarche suivante :

• Il est très clair, que la variation de pression est très grande au bord-avant et au bord-arrière à cause de la cambrure remarquable du profil dans ces deux zones. Pour cette raison, il faut lors de la discrétisation que les longueurs de segments au bord-avant et au bord-arrière soient très petites par rapport à celles de la zone intermédiaire. Autrement dit, la distribution des points de singularité soit très grande au bord-avant et au bord-arrière. L'abscisse es alors défini par :

$$x = c \left(1 - \frac{1}{2} (1 - \cos(\alpha)) \right) \quad (\text{III-26})$$

Tel que $\alpha \in [0, \pi]$ avec un pas de variation égale à $\frac{\pi}{n/2}$.

n : le nombre total de points choisi pour constituer le profil.

• A partir de l'ensemble des abscisses x dont donné par l'équation (III-26), on peut déterminer les ordonnées du profil symétrique (utilisant eq.III.25). L'influence des deux premiers paramètres ($Par(1)$, $Par(2)$) sur la ligne de cambrure est donnée par la relation suivante :

$$F(x) = \begin{cases} \frac{Par(1) x}{(Par(2))^2} \left(2 Par(2) - \frac{x}{c} \right) & x \leq Par(2) c \\ \text{et} \\ \frac{Par(1) (c - x)}{(1-Par(2))^2} \left(1 - 2 Par(2) + \frac{x}{c} \right) & x > Par(2) c \end{cases} \quad (\text{III-27})$$

La modification de la ligne de cambrure peut se voir d'une autre façon : Les points constituant la ligne de cambrure du profil symétrique vont subir des translations défini par la relation (III-27). Par conséquence tous les points constituant le profil symétrique vont subir la même translation de la ligne de cambrure (Fig.III.10).

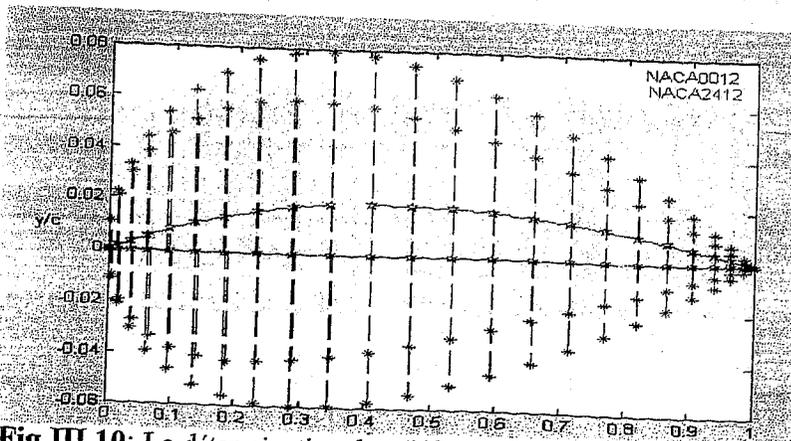
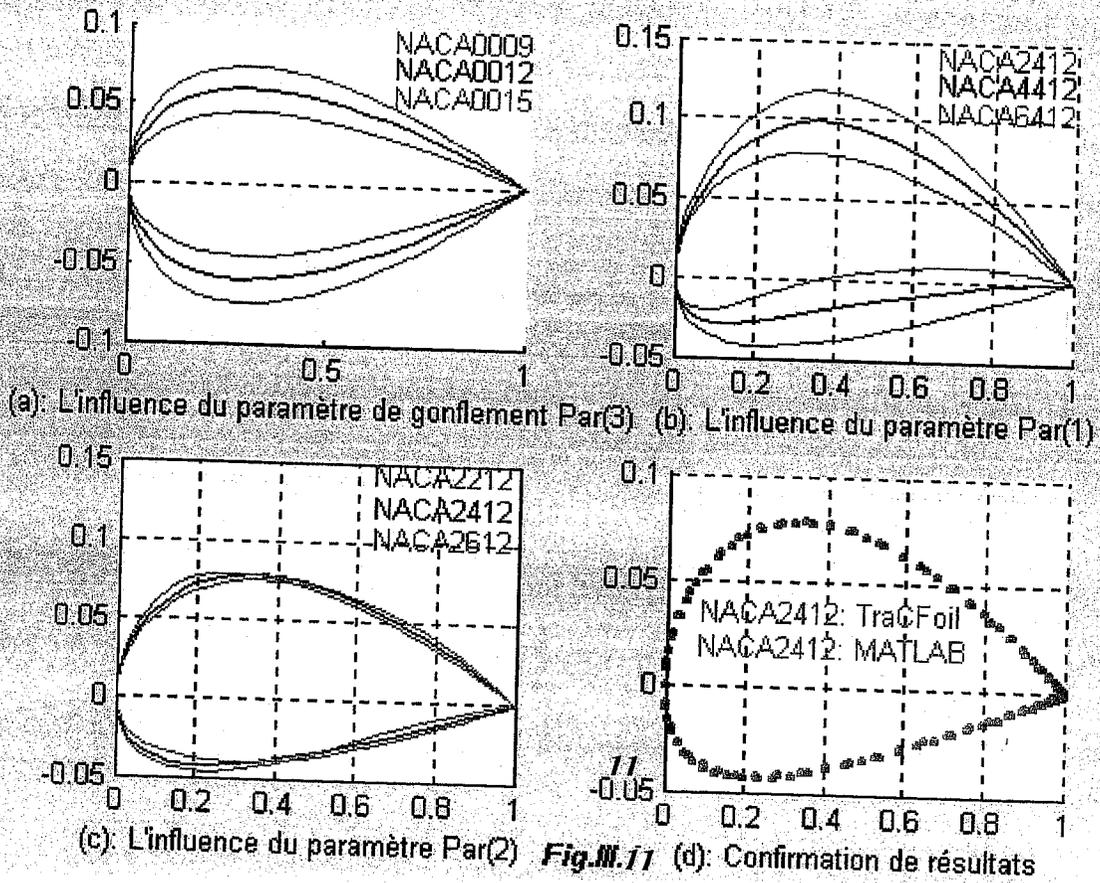


Fig.III.10: La détermination des différents profils à partir d'un profil symétrique.

Afin de représenter de profil nous avons mis au point un programme en MATLAB6p5.



La Fig.III.11 configure la modification qu'entraîne chaque paramètre d'influence sur la forme du profil.

La Fig.III.11 (d) Configure la différence entre un profil tracé par le TraCFoil et par le MATLAB. On voit pratiquement qu'il n'y a pas une grande différence entre les deux courbes. D'où la validité de notre programme.

TraCFoil : Logiciel de tracé de profils pour des modèles réduits.

III.5.2 Distribution de pression [20]

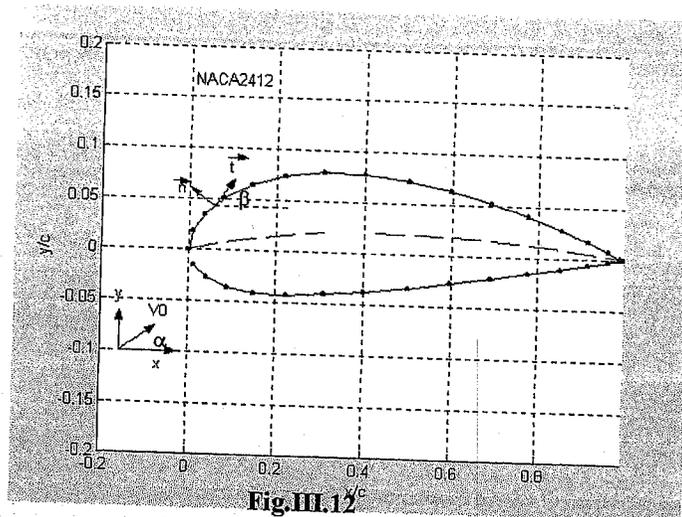


Fig.III.12

Nous considérons un profil de frontière Σ transversale à la direction du vent (Fig.III.12). Le vent se déplace avec une vitesse non perturbée \vec{v}_0 à un angle d'incidence α . La condition d'irrotationalité est automatiquement satisfaite, si le champ d'écoulement est caractérisé par la vitesse du potentiel φ . La vitesse relative d'air au-dessus de l'aile est indiquée par [3]:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \nabla \varphi \quad (\text{III-28})$$

L'équation de continuité mène à l'équation de Laplace:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (\text{III-29})$$

Avec l'angle d'incidence α étant défini, \vec{v}_0 est donné par :

$$\vec{v}_0 = \cos(\alpha) \vec{i} + \sin(\alpha) \vec{j} \quad (\text{III-30})$$

Si β est l'angle entre \vec{t} et l'axe des x , on a alors :

$$\vec{t} = \cos \beta \vec{i} + \sin \beta \vec{j} \quad \text{et} \quad \vec{n} = -\sin \beta \vec{i} + \cos \beta \vec{j} \quad (\text{III-31})$$

La condition de glissement sur le profil (condition de Neumann aux limites) peut être écrite:

$$\begin{aligned} \vec{v} \cdot \vec{n} = 0 &\Leftrightarrow (\vec{v}_0 + \nabla \varphi) \cdot \vec{n} = 0 \\ &\Leftrightarrow \overrightarrow{\text{grad}} \varphi \cdot \vec{n} = -\vec{v}_0 \cdot \vec{n} \end{aligned} \quad (\text{III-32})$$

$$\frac{d\varphi}{dn} = \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta \quad (\text{III-33})$$

Ecrivant d'abord les coordonnées des points qui constituent le profil dans le plan complexe :

$$z = x + i y$$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + i \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \tag{III-34}$$

L'angle β entre chaque segment du profil et l'axe des x est donné par la relation suivante :

$$\beta_i = \text{Imag}(\text{Log}(z_{i+1} - z_i)) \quad i \in [1, n] \tag{III-35}$$

D'où la relation (III-33) devient :

$$\left(\frac{d\varphi}{dn}\right)_i = \cos\alpha \sin\beta_i - \sin\alpha \cos\beta_i \tag{III-36}$$

La condition de *Kutta-Joukowski* impose que la vitesse au bord de fuite devrait être nulle :

$$\begin{cases} \left(\frac{d\varphi}{dn}\right)_{i=1} = 0 \\ \left(\frac{d\varphi}{dn}\right)_{i=n} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \cos\alpha \sin\beta_1 - \sin\alpha \cos\beta_1 = 0 \\ \cos\alpha \sin\beta_n - \sin\alpha \cos\beta_n = 0 \end{cases} \tag{III-37}$$

▪ **Matrice des coefficients d'influences**

Les coefficients d'influences sont données par l'équation (II-46) :

$$\begin{cases} A_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left[\cos(\beta_i - \beta_j) \text{Log} \frac{r_j}{r_{j+1}} + (\theta_{j+1} - \theta_j) \sin(\beta_i - \beta_j) \right] \\ B_{ij} = \frac{1}{2\pi} \left[(\theta_{j+1} - \theta_j) \cos(\beta_i - \beta_j) + \sin(\beta_i - \beta_j) \text{Log} \frac{r_j}{r_{j+1}} \right] \end{cases}$$

Calculons r_j , r_{j+1} , θ_j et θ_{j+1} :

Ecrivant d'abord les nœuds et les points de collocations sous forme des matrices.

$r_{ij} = \text{abs}(z_{ij} - m_{ii})$;

Les positions des nœuds

$$z_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} [z_1 & z_2 & \dots & z_{n-1}] \\ z_1 & z_2 & \dots & z_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ n-1 [z_1 & z_2 & \dots & z_{n-1}] \end{bmatrix}$$

Les positions des points de collocations

$$m_{ii} = \begin{bmatrix} \frac{z_1+z_2}{2} & \frac{z_1+z_2}{2} & \dots & \frac{z_1+z_2}{2} \\ \frac{z_2+z_3}{2} & \frac{z_2+z_3}{2} & \dots & \frac{z_2+z_3}{2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{z_{n-1}+z_n}{2} & \frac{z_{n-1}+z_n}{2} & \dots & \frac{z_{n-1}+z_n}{2} \end{bmatrix}$$

d'où:

$$\begin{cases} r_1 = |z_{jj} - m_{ii}| & j \in [1, n-1], i \in [1, n-1] \\ r_2 = |z_{jj} - m_{ii}| & j \in [2, n], i \in [1, n-1] \end{cases} \quad (\text{III-38})$$

$$\theta_{j+1} - \theta_j = \text{Imag} \left(\text{Log} \left(\frac{(z_{j+1} \ j+1 - m_{ii})}{(z_j \ j - m_{ii})} \right) \right) \quad (\text{III-39})$$

$$\beta_j = \text{angle}(z_{j+1} \ j+1 - z_j \ j) \quad (\text{III-40})$$

La vitesse tangentielle est donnée par la relation suivante :

$$u_{si} = \bar{V}_0 \bar{s}_i + B_{ij} s_i = V_0 \cos(\alpha) l_i \sin(\beta_i) + V_0 \sin(\alpha) l_i \cos(\beta_i) + B_{ij} s_i \quad (\text{III-41})$$

Et par suite ; le coefficient de pression est donnée par la relation suivante :

$$C_{pi} = 1 - \frac{u_{si}^2}{V_0^2} \quad (\text{III-42})$$

Notre but dans ce chapitre est de déterminer le coefficient de portance C_L (lift coefficient) de n'importe quel profil. La force de portance est une conséquence de la différence de pression entre la surface intrados et extrados de la pale.

Le coefficient de portance est donné par la relation suivante :

$$Cl = \sum_1^{n-1} Cp(j) \text{Real}[z(j+1) - z(j)] \cos(\alpha) + \sum_1^{n-1} Cp(j) \text{Imag}[z(j+1) - z(j)] \cos(\alpha) \quad (\text{III-43})$$

La détermination de toutes ces grandeurs exige un calcul numérique par ordinateur. Pour cette raison, on a effectué un programme en MATLAB PAE qui sert à calculer toutes ces grandeurs pour déduire la forme du profil.

III.5.3 Résultats

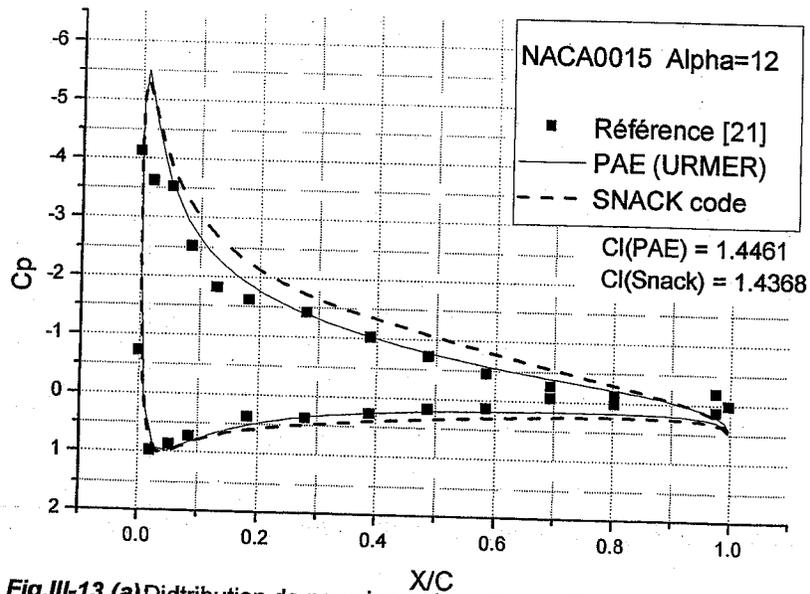


Fig.III-13 (a) Distribution de pression autour d'un profil d'aile type NACA0015, placé sous un angle d'attaque de 12°

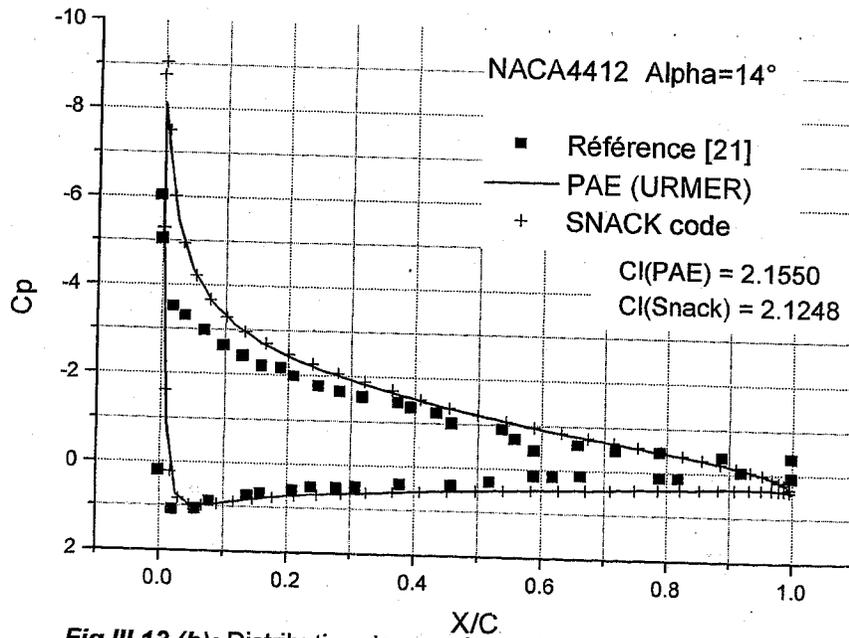


Fig.III.13 (b): Distribution de pression autour d'un profil NACA4412, placé sous un angle d'attaque de 14°.

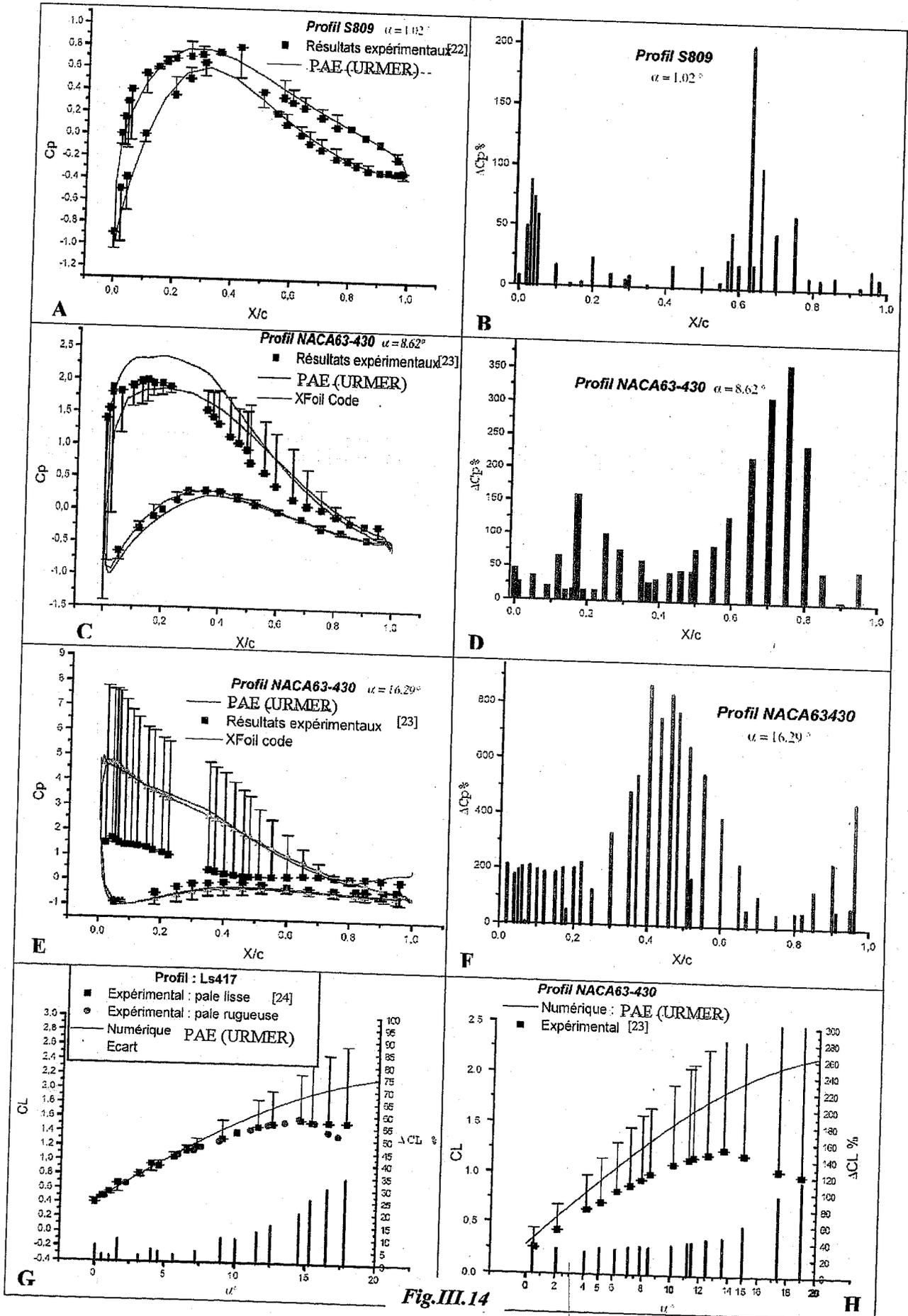


Fig. III.14

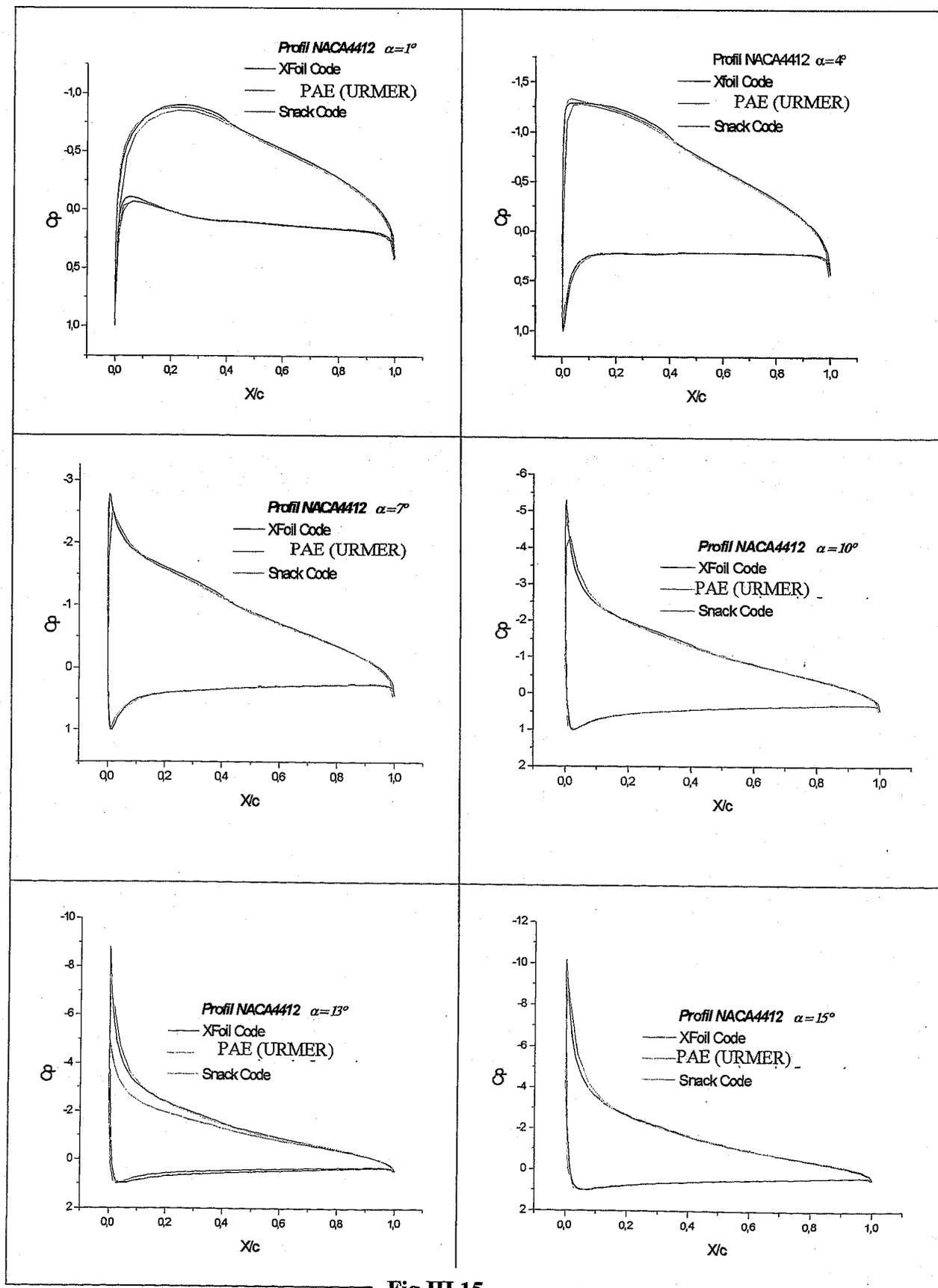


Fig.III.15

La Fig. III.14 (A) donne la distribution de pression autour d'un profil de type S809 sous un angle d'attaque ($\alpha = 1.02^\circ$). Nous voyons clairement que la courbe en bleu (résultats obtenus par notre PAE(URMER)) et les points en noirs (résultats expérimentaux [18]) sont très convergents. Cette convergence est confirmée par la Fig.III-14(B) où la majorité des écarts entre les deux résultats ne dépasse pas les 20% de la valeur expérimentale.

La Fig.III.14(C) configure la distribution de pression autour d'un profil de type NACA63-430 sous un angle d'attaque ($\alpha = 8.62^\circ$). On remarque que la courbe en bleu (résultats obtenus par notre PAE(URMER)) et les points en noirs (résultats expérimentaux [20]) sont un peu écartés. La Fig.III.14(D) met en évidence cet écart, peu considérable mais la majorité de ces écarts ne dépasse pas les 50% de la valeur expérimentale.

La distribution de pression autour d'un profil de type NACA63-430 sous un angle d'attaque ($\alpha = 16.29^\circ$) déterminé par la résolution numérique et l'expérimentation est donnée par la Fig. III.14(E). Les résultats expérimentaux et numériques sont très écartés. Dans la Fig.III.14(E), on voit que la majorité des écarts sont entre 150 et 800% de la valeur expérimentale.

La précision de notre PAE(URMER), dépend essentiellement de l'angle d'attaque. On remarque clairement cette dépendance dans la Fig.III.14(G) et (H), où le coefficient de portance (Cl) est donné en fonction de l'angle d'attaque α . Notre PAE(URMER) des écoulements potentiels est bien adapté pour des petits angles d'attaque ($\alpha < 15^\circ$). Au-delà de cet angle; le code devient invalide à cause de l'apparition de l'effet de viscosité qui diminue le coefficient de portance Cl et par conséquent l'exactitude.

En plus, la fig.III.15 montre que notre PAE(URMER) donne pratiquement les mêmes résultats obtenus par le code *Snack* "Super Numerical Airfoil Creation Kit" et Xfoil.

Nous allons limiter notre programme PAE(URMER) à des angles de calages inférieurs ou égale 15° .

III.6. Conclusion

Après avoir mis au point un programme d'analyse des éoliennes PAE (URMER) et vérifier sa validité devant les autres codes d'analyses des profils et devant les résultats expérimentaux (Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, August 2001).

Dans ce chapitre nous sommes arrivés aussi à modéliser le mouvement rotatoire d'hélice qui génère par la suite une puissance électrique, si elle est reliée à un générateur d'électricité.

CHAPITRE IV

ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT

Analyse et dimensionnement

Le profil, les dimensions des pales, la puissance éolienne disponible sur un site et les grandeurs électriques et mécaniques du générateur sont des paramètres très importants à cause de leur influence sur le taux de captation de l'énergie éolienne. La variation de ces grandeurs selon le besoin de puissance électrique désirée en un site d'implantation, nécessite une étude de simulation. Pour déterminer la forme et les dimensions des pales qui satisfont nos grandeurs électriques optimales désirées, nous avons développé un programme en MATLAB6p5 d'analyse des éoliennes nommé *PAE(URMER)* que nous avons enrichi par une optimisation numérique par simulation de tous les paramètres intervenants dans le calcul des énergies captée et convertie.

IV.1. Programme d'Analyse des Eoliennes *PAE(URMER)*

Notre programme d'analyse des éoliennes *PAE(URMER)* est développé en MATLAB6p5. Il est basé essentiellement sur le théorème des potentielles complexes résolues par la méthode des singularités.

Le programme *PAE(URMER)* est enrichi par une bibliothèque de profils garnie de fichiers .dat téléchargés des différents sites Internet [25] et représentant la forme de certains profils utilisés à travers le monde.

On distingue dans cette bibliothèque deux catégories :

- NACA 4-digits : c'est une série qui est décrit par une fonction et les trois paramètres introduits dans §III.5.1.1.
- Code *TracFoil* : un ensemble de fichiers .dat où chaque fichier contient des coordonnées d'un certain nombre de points utilisés pour le tracé des profils.
- Code *NACALTF* : qui représente lui aussi un profil sous forme de coordonnées de points.

Grâce à cette riche bibliothèque, on peut calculer le coefficient de portance C_L de n'importe quel profil qui existe déjà ou que l'on crée nous même dans cette bibliothèque de profils. Ce dernier permet le calcul de : C_{pw} , Ω , Γ et la puissance mécanique captée.

Exemple

Les courbes suivantes sont tracées selon le programme PAE(URMER), Voir l'organigramme en annexe

Le tracé du profil classique le plus utilisé en aéronautique NACA4412 :

- Le premier chiffre à gauche représente le coefficient de cintrage 4% de la corde.
- Le deuxième chiffre à gauche représente la position de cambrure 40% de la corde.
- Les deux derniers chiffres représentent le gonflement de la pale 12% de la corde.

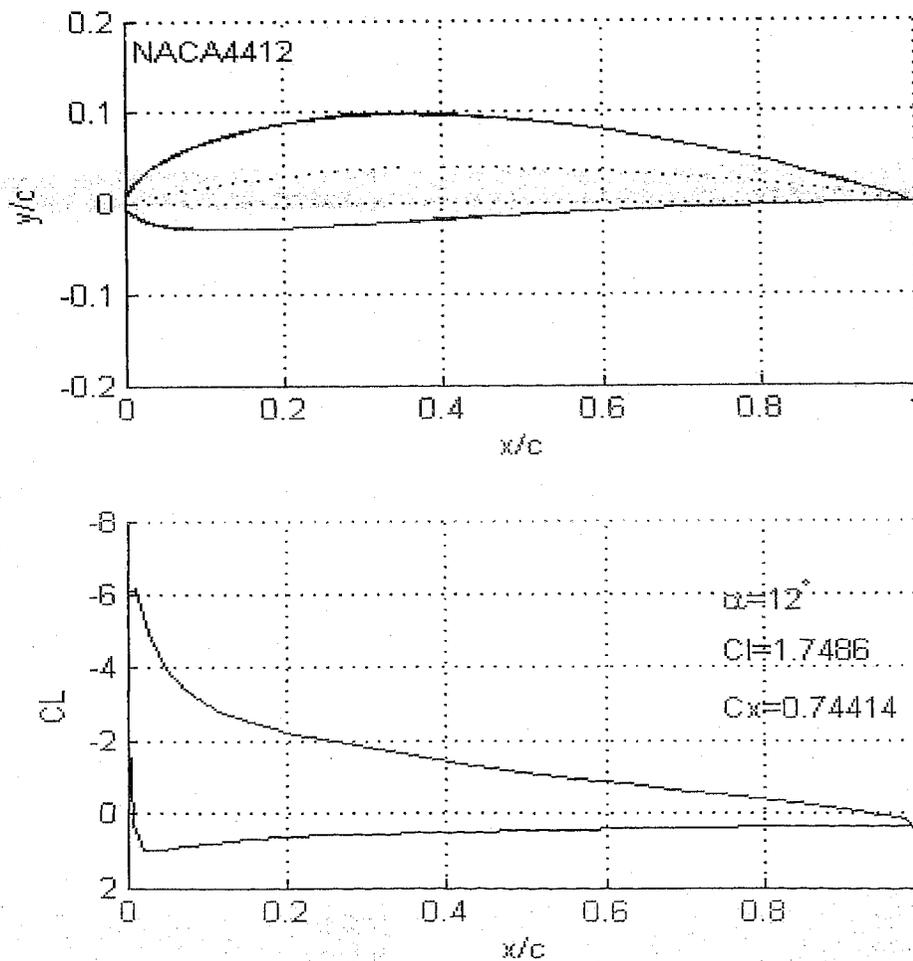


Fig.IV.1: La distribution de pression autour du profil.

La Fig.IV.1 obtenue par le programme PAE(URMER) représente la distribution de pression autour du profil. On voit que la pression sur la surface intrados est plus grande que celle qui est à la face extrados. Le signe moins (-) indique la face intrados.

Notre programme PAE(URMER) offre la possibilité d'une étude dynamique de l'aéroturbine, où nous pouvons calculer : la vitesse de rotation d'hélice, la puissance mécanique captée par l'aéroturbine, le coefficient de puissance C_{pw} et le couple mécanique.

Notre programme PAE(URMER), nous permet même de faire le choix entre une aéro turbine libre et une aéro turbine couplé avec un générateur qui est défini par les paramètres de modélisation (voir § III.3.)

IV.2. Caractéristiques de l'hélice

Le coefficient de puissance C_{pw} est un paramètre très important pour le dimensionnement des éoliennes. L'importance de son étude se manifeste surtout dans les sites moins ventés classe1 ($V_e < 3\text{m/s}$) et classe2 ($3 < V_e < 4\text{m/s}$) [26], par exemple la région de Zénata (wilaya de Tlemcen) où la vitesse moyenne annuelle du vent varie entre 3 et 4 m/s [station météorologique de Zénata]. Donc l'amélioration de ce coefficient, présente un objectif très intéressant dans le domaine des aéro-générateurs.

Le profil de pales est l'un des paramètres principaux qui influe directement sur le coefficient de portance C_L et par conséquent sur le coefficient de puissance C_{pw} . D'où l'amélioration du coefficient de portance C_L nécessite un choix typique du profil. Mais lors de ce choix, il faut tenir compte aussi des contraintes subits par chaque élément de surface des pales. Le phénomène de fissure exige de bonnes caractéristiques mécaniques en terme de rigidité et résistance spécifique associées aux exigences de légèreté, coût et durée de vie.

Comme on a vu, le choix du profil dépend à la fois de l'amélioration du coefficient de portance C_L et de la minimisation des contraintes subit par les pales.

Dans ce qui suit nous allons voir l'influence de quelques paramètres sur la conversion d'énergie éolienne .

IV.2.1 Type de profil

Nous avons choisi de travailler avec la série *NACA 4-digit* à cause de sa simplicité : car nous pouvons obtenir un grand nombre de profils seulement par la variation des trois paramètres qui caractérise le profil défini par les quatre chiffres (voir §III.5.1.1).

- Le premier chiffre à gauche représente le coefficient de cintrage (NACA 2420).
- Le deuxième chiffre à gauche représente la position de cambrure (NACA 2420).
- Les deux derniers chiffres représentent le gonflement de la pale (NACA 2420).

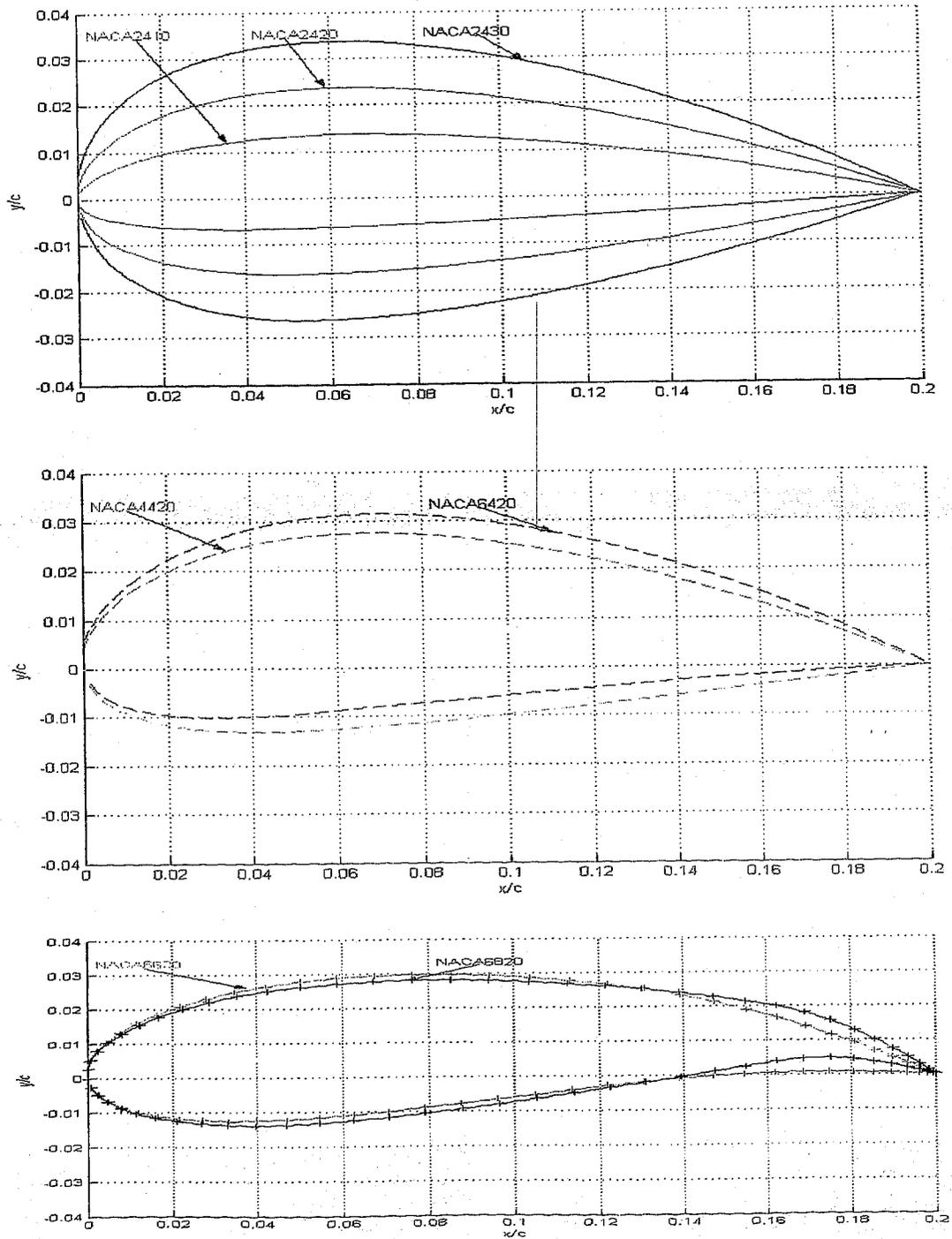


Fig.IV.2(a) : Différents profils obtenus par le PAE

Vu les différents profils représentés sur la Fig.IV.2(a), il est conseillé de choisir pour les sites moins ventés le profil le plus cambré *NACA6820* en faveur des caractéristiques dynamiques et énergétiques définies ci-dessous :

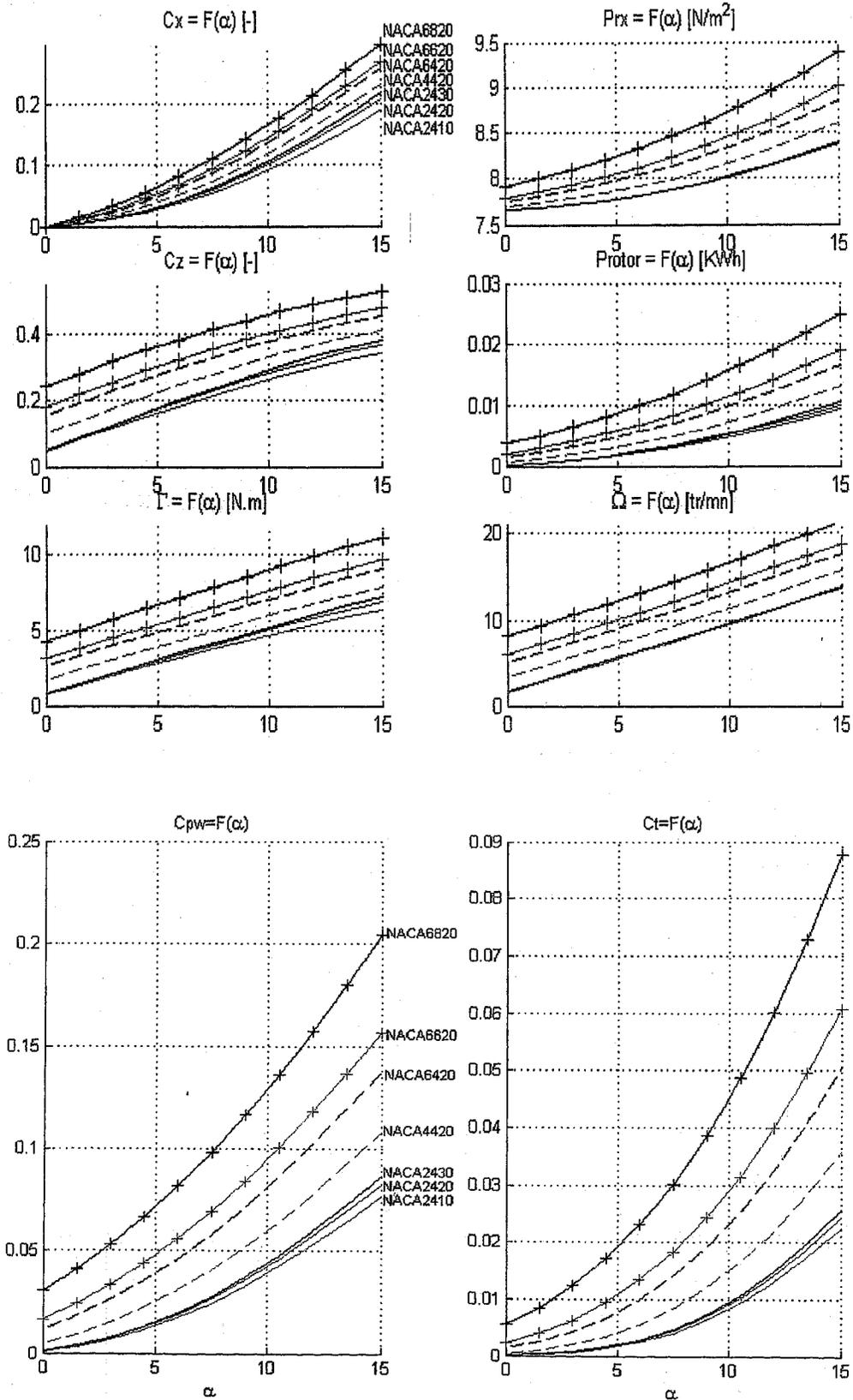


Fig.IV.2(b) : Caractéristiques de l'hélice

La FigIV.2(b) représente la variation du coefficient de portance C_z , le coefficient de traîné C_x , le coefficient de puissance C_{pw} , le coefficient de couple C_t et la puissance captée par le rotor en fonction du profil et l'angle de calage α .

Remarque : chaque profil et les grandeurs correspondantes (C_z , C_x , C_t , C_{pw} , ...) sont représentés par la même couleur.

Dans les courbes représentant $C_{pw} = F(\alpha)$:

- On remarque que les trois courbes en ligne continue qui représentent respectivement (NACA2410, NACA2420, NACA2430) sont très proches.
- Par contre les autres courbes qui représentent (NACA2420, NACA4420, NACA6420, NACA6620, NACA6820) sont éloignés l'un de l'autre.

Donc pour obtenir un meilleur coefficient de puissance dans la série *NACA4-digit*, il suffit de trouver des valeurs élevées du coefficient de cintrage et de la position de cambrure. L'augmentation de ces deux coefficients font croître aussi les contraintes subites par la pale (Fig.IV.3 $F_x=F(\alpha)$).

L'optimisation de ces deux coefficients tient en compte à la fois de l'amélioration du coefficient de puissance et de la minimisation des contraintes subites par chaque élément de surface de la pale - problème de fissure surtout sur le bord arrière de la pale où l'épaisseur est très fine.

IV.2.2 Dimension et nombre de pales

La surface balayée par l'hélice est un facteur très important dans la captation de l'énergie éolienne. Il y a quatre paramètres qui contrôlent cette surface :

- L'angle d'attaque α .
- La longueur et la corde de la pale.
- Le nombre de pales.

La fig.IV.2(b) montre la croissance de la puissance mécanique captée par l'hélice en fonction de l'angle d'attaque α dans l'intervalle (0 à 15°). mais il faut tenir en compte aussi lors du choix de α , les contraintes subites par les pales de l'hélice.

Remarque : Nous avons limité tous les calculs à $\alpha = 15^\circ$ à cause de la non-exactitude au delà de cet angle, du calcul des coefficients de portance C_l par le programme PAE et des résultats expérimentaux §III.5.3. Sinon la puissance captée va rencontrer un pic puis décroît en fonction de α .

a) La corde de pales

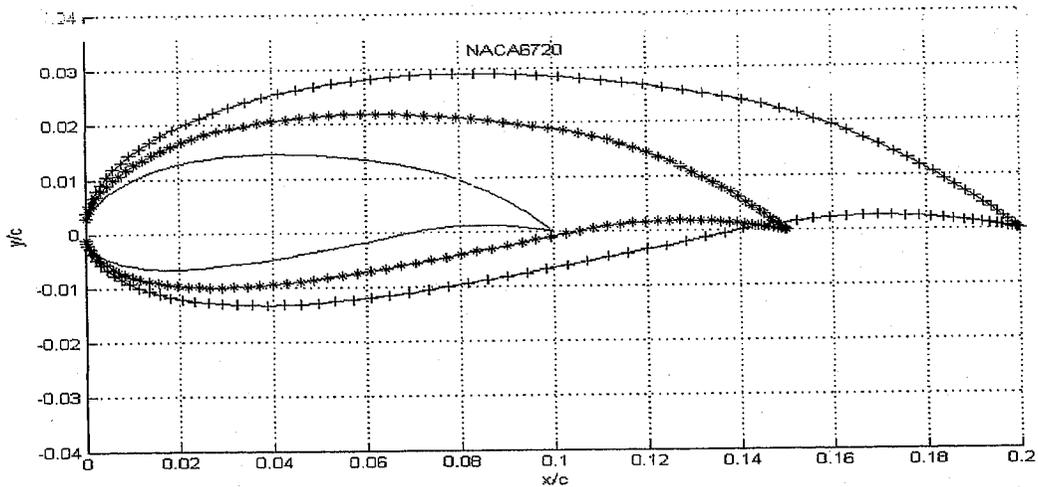
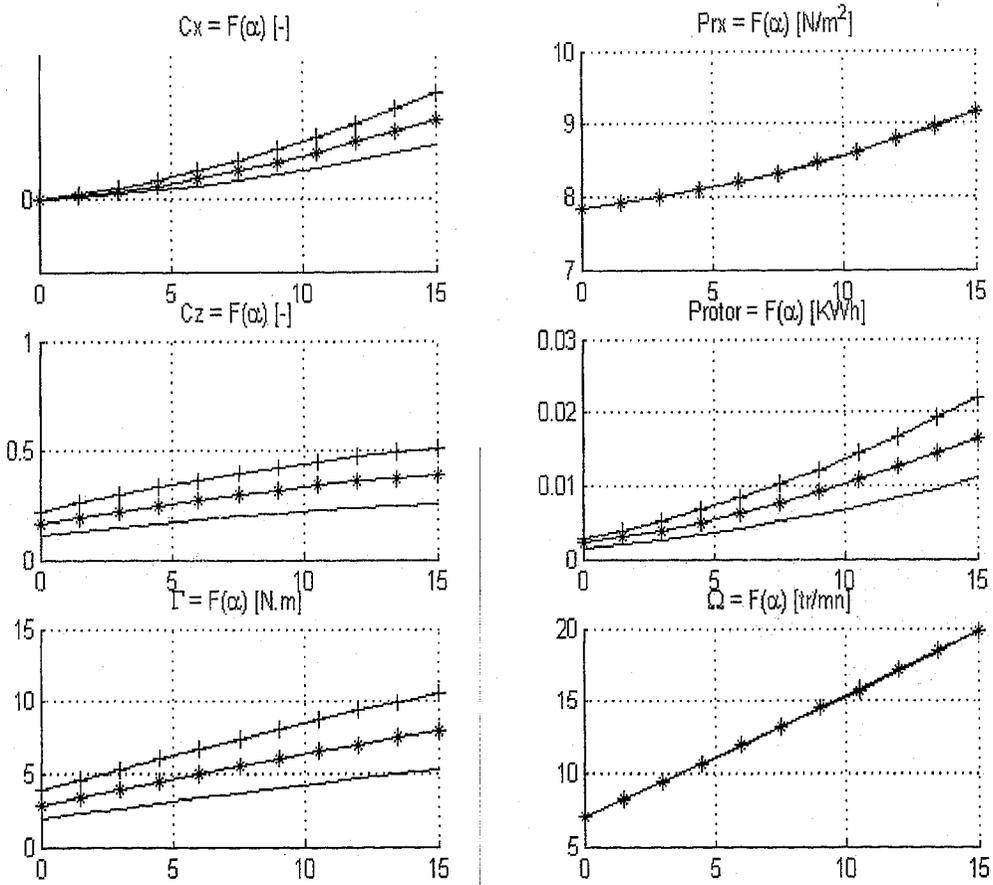


Fig.IV.3(a): Profil NACA6720 à différentes cordes

Vu l'influence de la longueur de corde sur les caractéristiques dynamiques et énergétiques de l'hélice. Il est préférable de choisir une corde qui nous assure à la fois, la vitesse de rotation désirée et un coefficient de puissance élevé.



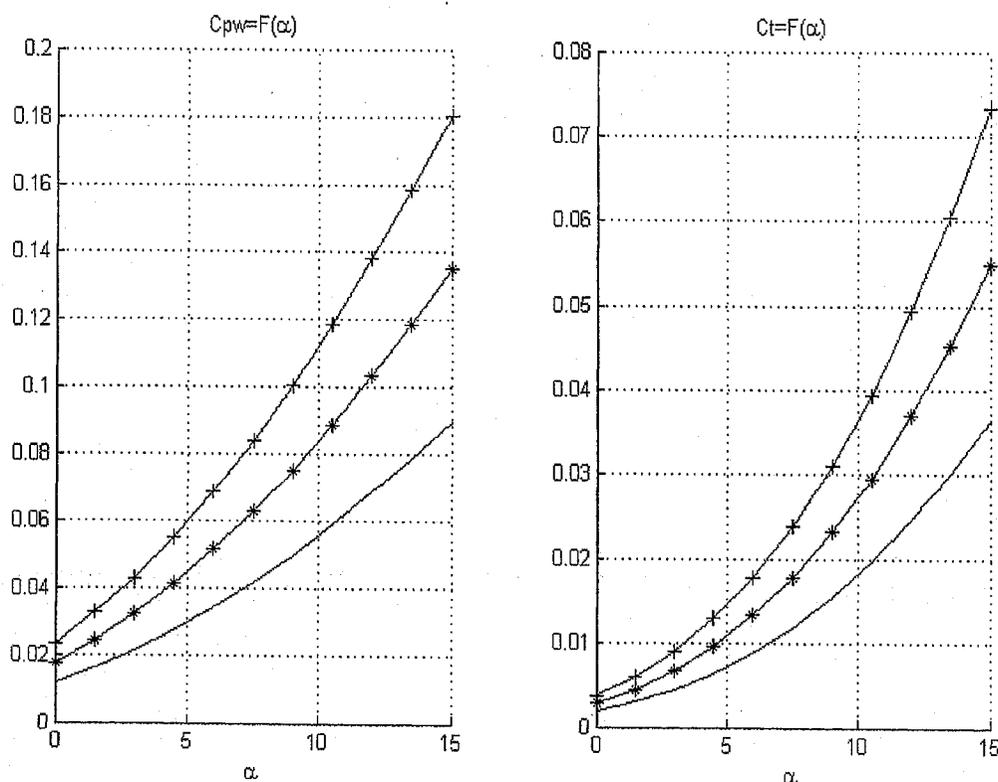


Fig.IV.3(b): Influence de la corde sur les caractéristiques dynamique et énergétique de la turbine

La Fig.IV.3(b) représente des résultats obtenus par une hélice de diamètre 2.4 m formé par trois pales de longueur 1m et de profil *NACA6720*. On voit bien que la puissance captée, le couple mécanique, le coefficient de puissance et le coefficient de couple varient proportionnellement avec la corde c de la pale. Par contre la vitesse de rotation Ω et la pression de contrainte restent constantes.

Donc l'augmentation de la longueur de corde c nous permettra d'élever la puissance mécanique. Mais il y a toujours des facteurs limitatifs comme le taux de remplissage de l'hélice et la force axiale sur toute l'hélice.

b) La longueur des pales

Considérons une hélice de profil (*NACA6720*), de corde ($c=0.2m$), de masse volumique ($550kg/m^3$) et de nombre de pales ($n_p=3$). L'influence de la longueur de pales sur les caractéristiques de l'hélice et pour des longueurs de $R=1, 1.2, 1.5m$ est représenté sur les figures suivantes:

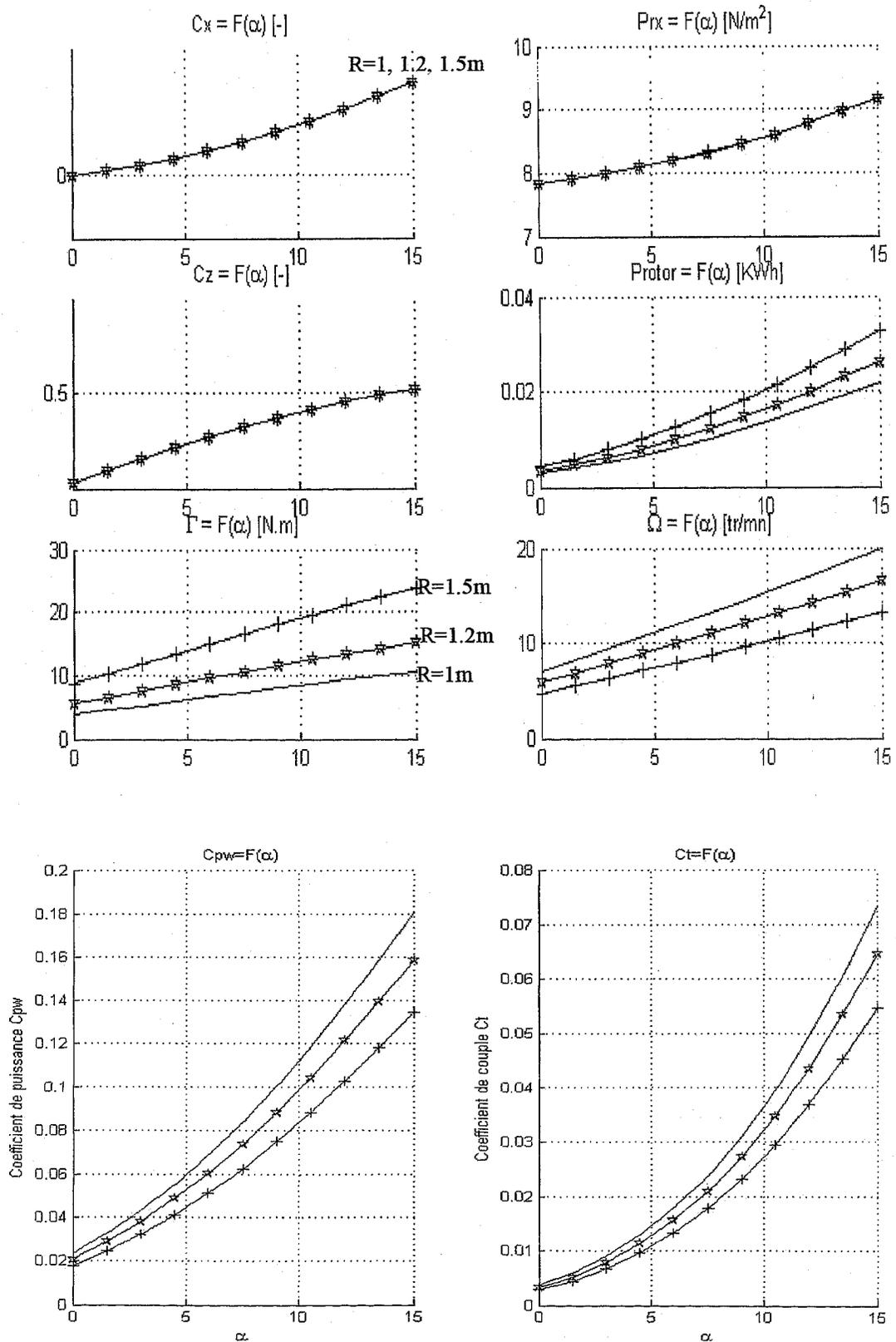


Fig.IV.4: L'influence de la longueur des pales sur les caractéristiques dynamique et énergétique de la turbine

La Fig.IV.4 représente les résultats obtenus par simulation de trois différentes hélices de diamètres suivants $D=2.5, 2.9$ et 3.5 m avec la même valeur de la corde 0.2 m et le même profil *NACA6720*. On remarque que la puissance capté par le rotor augmente avec l'augmentation du diamètre. Résultat logique puisque l'augmentation de D entraîne une augmentation de la surface balayée. Par contre la vitesse de rotation diminue en fonction de D à cause de la croissance de la force de l'air résistant au déplacement et du moment d'inertie de l'hélice.

Donc lors du choix de la longueur des pales il faut tenir compte aussi de la vitesse de rotation, qui est un paramètre limitatif de la tension électrique au niveau du générateur électrique.

c) Nombre de pales

L'influence du nombre de pales de l'hélice sur les caractéristiques mécaniques et énergétiques de l'aéroturbine pour : $R=1.5$ m, $c=0.2$ m, $\rho=550$ kg/m³, *NACA6720*, $V_e=3.5$ m/s sont représentées par les courbes suivantes :

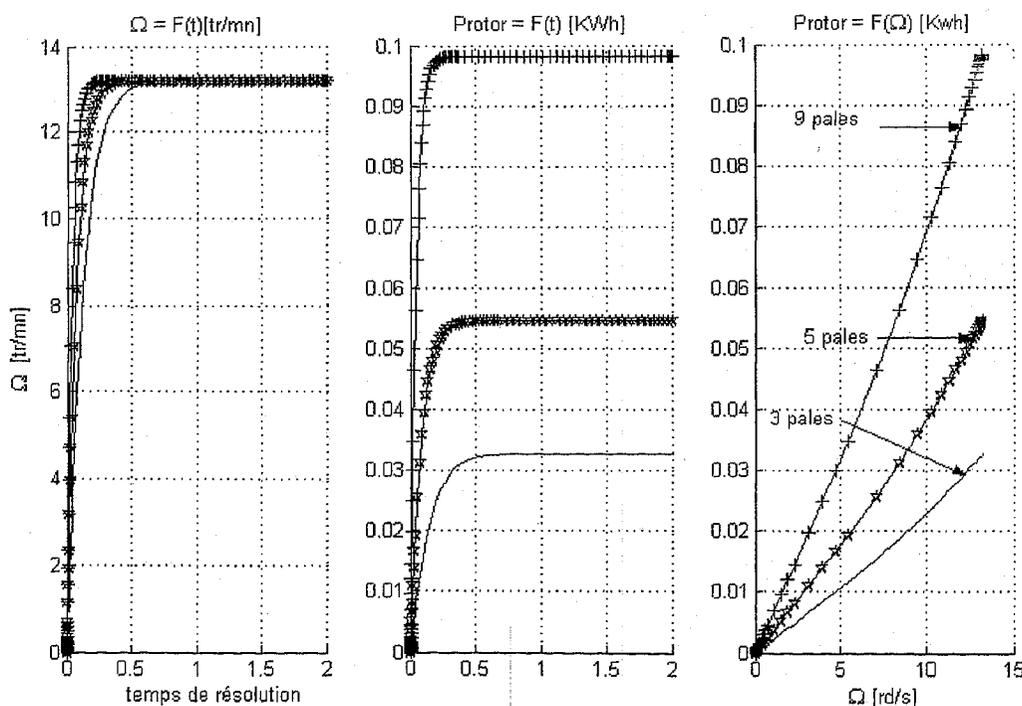


Fig.IV.5: L'influence du nombre de pales sur la puissance mécanique et la vitesse de rotation.

La puissance mécanique captée est calculée pour une hélice de diamètre 3.5 m et une vitesse $v = 3.5\text{ m/s}$ (vitesse moyenne annuelle de la région de Zénata). La masse volumique des pales est prise égale à 550 kg/m^3 .

La Fig.IV.5 montre la variation de la puissance mécanique et de la vitesse de rotation en fonction du nombre de pales. Ce dernier est limité par le taux de remplissage et la masse de l'hélice que peut supporter l'aérogénérateur.

On remarque que le nombre de pales n'influe pas sur la valeur de la vitesse de rotation. Son influence est appréciable sur le temps de stabilité de la vitesse de rotation.

Pour des pales de longueur ne dépassant pas 6 m , on peut utiliser le lamellé-collé [3]. C'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur avec une bonne tenue en fatigue. Sa masse volumique varie entre 450 et 550 Kg/m^3 .

On peut aussi utiliser : *Nylon renforcé de fibre de verre, thermoplastique renforcé de fibre de carbone, tilleul d'Amérique (bois)* [annexe].

IV.3 Application au site de Tlemcen (Zénata)

D'après l'estimation générale de la puissance éolienne disponible au niveau de la région de Zénata [station météorologique de Zénata], on remarque que la vitesse moyenne journalière varie entre 2.5 et 6 m/s et la vitesse moyenne annuelle du vent est 3.5 m/s . Cette faible vitesse, nous oblige à diriger nos travaux vers les éoliennes de petites puissances où leur vitesse de démarrage est généralement entre 2 et 3 m/s .

Pour calculer la puissance éolienne annuelle et mensuelle disponible dans la région de Zénata ainsi que les puissances mécaniques maximales que nous pouvons capter. Nous avons utilisé une hélice qui a les caractéristiques suivantes :

- La masse volumique des pales $\rho = 500\text{ Kg/m}^3$ (lamellé-coller).
- Le Nombre de pales : 9 .
- La longueur de pale : 2 m .
- La corde : 0.3 m .
- Le diamètre de l'hélice : 4.5 m .
- Le profil : *NACA8615*.
- $\beta = 75^\circ$.

Dans la série *NACA4-digit*, Le coefficient de portance C_L le plus élevé correspond au *NACA9930*. Mais en raison des problèmes technologiques de construction, nous avons choisi un profil qui n'est pas trop cambrer (*NACA8615*). Nous avons aussi pris un rendement nominal du générateur de l'ordre de 80 % d'après les résultats déjà obtenus à l'URMER [7]. La figure suivante représente le profil *NACA8615* et sa distribution de pression :

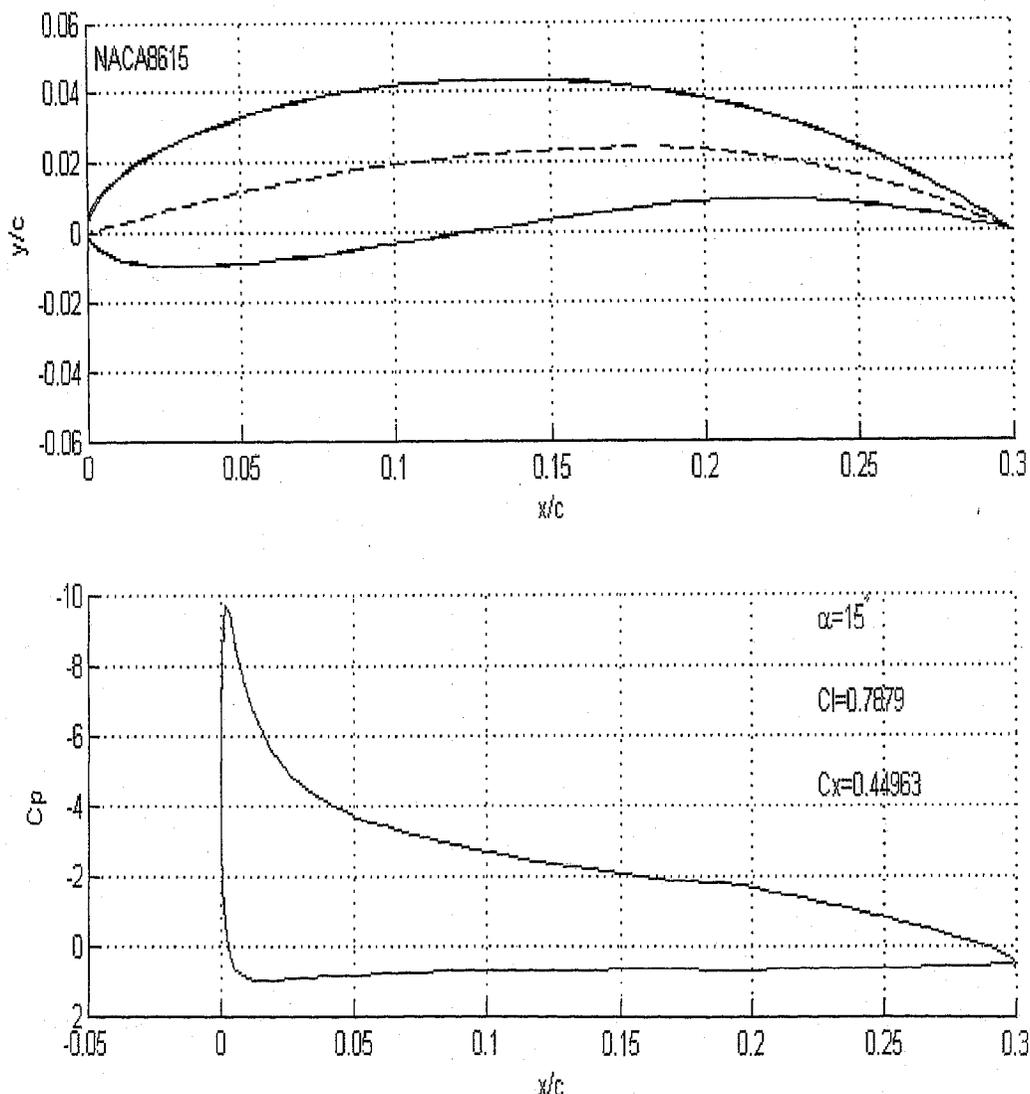


Fig.IV.6(a): La distribution de pression autour du profil.

Evaluation de la puissance mécanique

Pour les paramètres d'une hélice définie ci-dessus et à l'aide du *PAE*(URMER) nous avons calculé la puissance cinétique du vent disponible au site de Zénata (en 2002) puis nous avons calculé la puissance mécanique captée par notre turbine (FigIV.7).

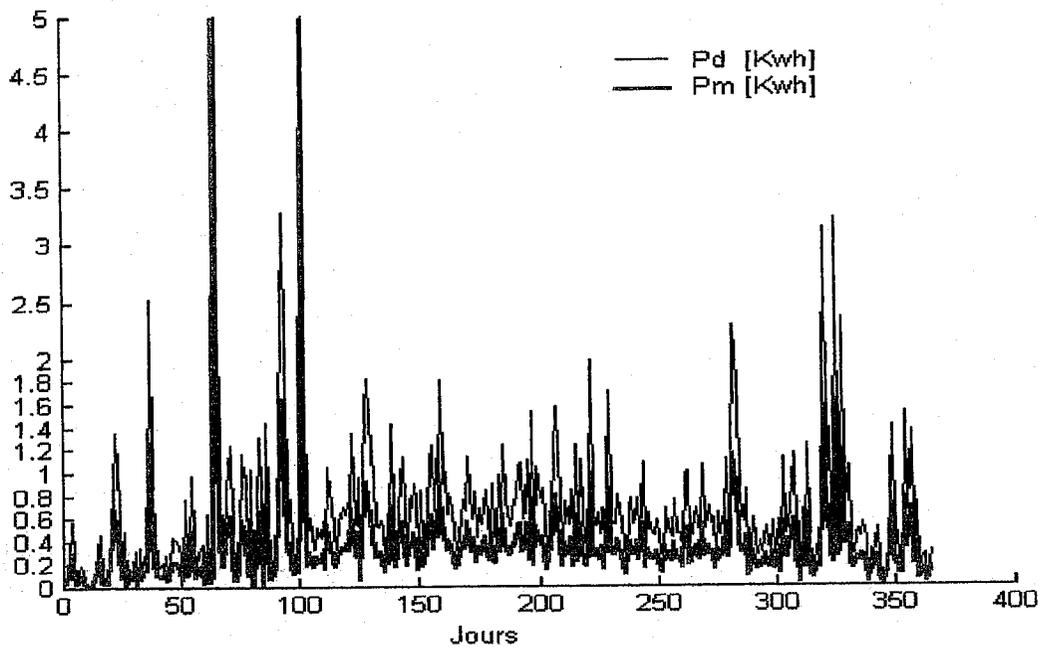


Fig.IV.7: Calcul de la puissance du vent (moyenne journalière) et de la puissance mécanique captée

La figure IV.7 représente les distributions de la puissance cinétique journalière du vent et de la puissance mécanique captée par l'hélice (Année 2002). Vu la variation aléatoire du vent, même si cette représentation n'est pas significative, elle donne la plage de variation d'un site sur l'année. La puissance mécanique captée à Zénata varie donc entre 0.2 et 0.6 Kwh.

Pour les vitesses moyennes du vent mensuel, nous avons trouvé les résultats suivant :

mois	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
V_{em} (m/s)	2.6	3.2	3.7	4.3	4.1	4.2	4.3	4.0	3.8	3.8	4.1	3.3
P_d (Kwh)	0.174	0.325	0.503	0.790	0.685	0.736	0.790	0.545	0.636	0.545	0.685	0.373
P_m (Kwh)	0.089	0.166	0.257	0.404	0.351	0.376	0.404	0.326	0.280	0.280	0.351	0.191
P_e Kwh	0.071	0.133	0.205	0.323	0.280	0.300	0.323	0.260	0.224	0.224	0.280	0.152
Ω tr/mn	7.81	9.61	11.11	12.91	12.32	12.61	12.91	12.02	11.41	11.41	12.32	10.05

Tab01

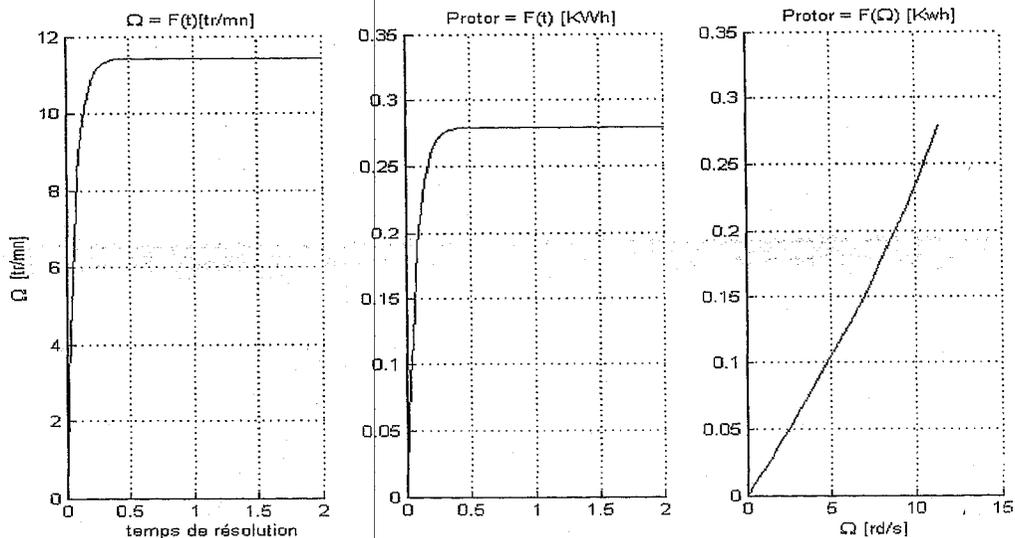
V_{em} : La vitesse moyenne du vent mensuelle.

Le Tab.01 donne les valeurs de la puissance moyenne mensuelle du vent sur toute l'année 2002. Les vitesses du vent sont mesurées au niveau de la station météorologique de Zénata à une hauteur de 10 m du sol.

Pour une vitesse de vent moyenne annuelle de Zénata nous obtenons :

V_e moy. annuelle	P_d (Kwh)	P_m (Kwh)	P_e (Kwh)	Ω (tr/mn)
3.8 m/s	0.545	0.280	0.224	11.5

Tab02



FigIV.6(b): La vitesse de rotation et la puissance mécanique donnée par une hélice de diamètre 4.5m, contient 9 pales, la vitesse du vent est 3.8m/s. Les pales sont fabriquées de Lamellé-collé ($\rho = 500 \text{ Kg/m}^3$).

La Fig.IV.6(b) représente la puissance mécanique captée par une hélice à vide et sa vitesse de rotation.

La puissance mécanique atteinte au niveau de l'hélice est d'environ 280W. Même en présence d'un générateur nous aurons des résultats intéressants puisque le rendement nominal des générateurs est généralement de l'ordre de 80 % [7]. Notons que ces résultats sont calculés à la vitesse de vent de 3.8 m/s (la région de Zénata).

IV.4 Etude comparative

Dans le domaine de l'industrie des éoliennes, on trouve souvent la puissance nominale fournie par les éoliennes. Voici un petit tableau qui représente une comparaison entre la puissance électrique nominale donnée par les constructeurs, de quelques éoliennes commercialisées et la puissance électrique calculée par le **PAE(URMER)** pour le même diamètre du rotor, nombre de pales et masse volumique du matériau utilisé [Annexe].

Les éoliennes commercialisées						PAE(URMER)	
	<i>Vitesse nominale</i> V_n (Km/h)	<i>Diamètre Du rotor</i> (m)	<i>Nombre de pales</i>	<i>Matériau des pales</i>	P_{eg} <i> nominale</i> (Watts)	P_m <i> PAE</i> (Watts)	P_e <i> PAE</i> (Watts)
Whisper 600	40	2.2	3	tilleul Amérique	600	761.1	613.2
Wind Baron 750	48	2	3	tilleul Amérique	750	882.5	703.2
BWC 850	45	2.5	3	Fibre de verre	850	1200.3	960.7
Whisper 1000	40	3	3	Fibre de verre	1000	1030.5	824.6

Tab03

On remarque que les puissances électriques calculées par le *PAE* sont très proches des puissances nominales données par les fournisseurs.

Cette comparaison nous confirme bien la validité de notre programme *PAE(URMER)*.

IV.5 Conclusion

Pour implanter et tirer le maximum de puissance d'une éolienne sur un site, nous avons mis au point un programme d'analyse des éoliennes *PAE(URMER)* enrichi par une bibliothèque de profils de pales que nous avons put télécharger des différents sites Internet.

Ce programme permet l'étude des différents paramètres qui caractérisent l'hélice et leurs influences sur la puissance mécanique captée. Ces paramètres sont : le profil, la longueur de pale et sa corde, le diamètre de la turbine, le nombre de pales, la masse volumique et la vitesse du vent.

Ce programme permet aussi le choix d'une éolienne adapté à un site donné.

Ce programme permet aussi le dimensionnement de l'aéroturbine à différents vitesses de vent et je dirais même qu'il peut être appliqué aux différentes brises d'un site.

Ce programme permet aussi de prévoir les contraintes subits par la surface des pales et contribue au choix de matériaux adéquats pour la construction des pales.

Ne possédant pas de gisement éolien pour le site de Tlemcen, les résultats d'analyse obtenus par le *PAE(URMER)* pour le site de Zénata (Année 2002) sont satisfaisants à notre avis.

L'application du *PAE(URMER)* à différentes éoliennes commercialisées, confirme bien sa validité au différentes gammes d'éoliennes.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a été réalisé dans le but de faire une analyse fine des aérogénérateurs, et afin de permettre le choix d'une éolienne adapté à un site bien défini.

Dans une première étape nous avons effectué un rappel sur les différents types de vent et de brises. Ces dernières sont des phénomènes locaux d'origine convective et qui dépendent essentiellement du relief. Sur la lumière de ce rappel, nous avons conclu que la puissance éolienne varie d'un site à un autre. Pour cette raison il faut faire une étude appropriée à chaque site et non pas se baser sur les études météorologies généralisées.

Nous avons ensuite effectué un rappel sur les différents types d'éoliennes à axe horizontal et à axe vertical puis une étude comparative entre les deux types de moteurs éoliens (mode de fonctionnement, coefficient de puissance, coefficient de couple...etc.). Nous avons abouti en un premier temps, que les éoliennes à axe horizontal sont les plus efficaces s'ils sont bien adaptés avec leur vitesse de démarrage. Nous distinguons deux types d'éoliennes à axe horizontal : Eoliennes lentes et Eoliennes rapides. La première se caractérise par une vitesse de démarrage de l'ordre de 2 à 3 m/s, un nombre de pales supérieur à 3 et un couple de démarrage relativement fort. La deuxième se caractérise par une vitesse de démarrage supérieur à 4 m/s et un nombre de pales ne dépassant pas 4 pales et elles sont plus puissantes que les éoliennes lentes.

Le choix de la turbine adaptée avec la puissance éolienne disponible sur un site nécessite un calcul des différentes grandeurs et par conséquent le choix du profil des pales de l'hélice.

Avec le peu de données disponibles à l'URMER, nous avons enfin réussi à développer un Programme d'Analyse de profil de pales des Eoliennes PAE(URMER) enrichie par une bibliothèque de profils de pales que nous avons pu télécharger des différents sites Internet.

Notre programme détermine la puissance de l'hélice, le coefficient de portance de n'importe quel profil de pale. Il détermine aussi la puissance mécanique captée par la turbine et permet le choix de l'éolienne adapté à un site bien défini.

Pour implanter et tirer le maximum de puissance d'une éolienne sur un site, notre programme permet l'étude des différents paramètres qui caractérisent l'hélice et leurs influences sur la puissance mécanique captée.

Notre programme permet aussi de prévoir les contraintes subites par la surface des pales et contribue au choix de matériaux adéquats pour la construction des pales.

Pour la région de Tlemcen où la vitesse moyenne du vent annuel est de l'ordre de 3 à 4 m/s les éoliennes lentes sont les mieux adaptés.

Ne possédant pas de gisement éolien pour le site de Tlemcen, les résultats d'analyse obtenus par le *PAE(URMER)* sur le site de Zénata (Année 2002) sont prometteurs.

L'application du *PAE(URMER)* à différentes éoliennes commercialisées, confirme bien sa validité aux différentes gammes d'éoliennes.

En conclusion, l'utilisation d'un programme d'analyse est nécessaire pour l'implantation d'une éolienne et contribue au choix de l'éolienne adapté au site.

Les perspectives :

Ce travail nécessite encore des recherches dans le domaine des machines de puissances (générateurs), dans le domaine des matériaux (rigidité et résistance) et dans le domaine de la technologie.

Le *PAE(URMER)* sera suivi par une étude économique pour attirer l'attention des investisseurs vers l'exploitation de l'énergie éolienne de la région de Tlemcen.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] Fédération Française de Parachutisme « PARAPENTE »
www.sxb.rte.fr/FFP-manuel
- [2] Désiré Le Gourières, « Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations », Edition EYROLLES, 1980
- [3] CUENOT Boris et GRAFF Christophe «Energie éolienne, fonctionnement, contraintes et perspective sur l'avenir.
<http://membres.lycos.fr/tipemaster/TIPE/Eole/Eole.html>
- [4] C.G. JUSTUS, « Vent et performances des éoliennes » Edition SCM, 1980
- [5] Alain THERON « Sciences industrielles Mécanique » Edition : ellipses 1999
- [6] DERBRY J. , Franklin Institute Press, « Energie éolienne » Edition SCM Paris 1980.
- [7] MERAD Laarej « Contribution à l'étude d'un système d'aérogénérateur à rendement élevé Application au site de Tlemcen » Thèse de Magister, Université ABOU BAKR BELKAÏD L.M.E.R –Tlemcen 2001.
- [8] J. LUNEAU, A. BONNET, « Théories de la dynamique des fluides » Edition : Cepad 1989
- [9] J-F. Roy « Fluides parfaits incompressibles » Edition : Ellipses 1999
- [10] Daniel Euvrand « Résolution numérique des équations aux dérivées partielles » Edition : Masson 1990.
- [11] Haritza CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » Thèse de Doctorale, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, décembre 2003.
- [12] Rodriguez M.A. « Sistema de control sensorless del motor de inducción, basado en un observador de estado adaptativo » Thèse Doctorale de l'Université de Zaragoza, 1999.
- [13] Site Windpower, à : <http://windpower.org/>
- [14] Le Courières D., « Energie éolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations, deuxième édition, Eyrolles Paris, 1982
- [15] Vechiu I., « L'optimisation de la récupération de l'énergie éolienne. Simulation en temps réel d'une turbine » DEA d'Electronique de l'Université du Havre, 2002

ANNEXES

Annexe 01

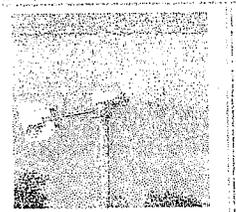
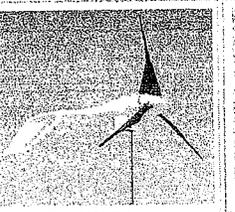
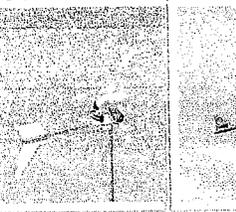
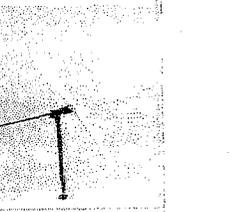
**Les vitesses de vents en m/s
prélevées en 2002
station météorologique de Zénata**

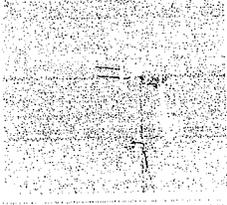
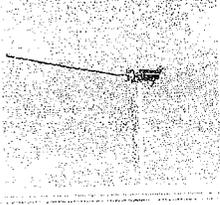
Jour	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août.	Sept.	Oct.	Nov	Dec.
01	1.5	0	1.5	3.11	4	3.21	3.42	4.38	4.77	3	3.75	2.63
02	2.5	3.25	4	5.33	5.13	4	4.6	3.25	3.14	4	4.5	3.5
03	2.75	2.33	1.91	6.12	4.57	4.8	3.88	5	4	3.55	4.87	3.81
04	3.88	3	2.12	6.91	3.81	5	5	3.5	3.66	3.91	3.42	3.65
05	3	3	3	4	4.58	4.05	4.21	4.8	3.54	3.8	3.8	3.4
06	1.71	6.33	10.95	4.26	2.16	4.83	4.06	4	3.88	4.8	1.71	1.71
07	2.28	4.41	6.54	3.38	4.56	4.4	3.77	3.45	3.5	3.62	4.05	3.17
08	2.66	3.6	4.54	2.75	5.39	5.66	4.22	3.2	3.18	4.46	3.11	2.89
09	2.4	2.85	3.3	3.3	5.68	4.5	4.27	4.1	2.81	6.12	5	3.7
10	1.85	2.6	3.35	2.9	4.9	4.66	4.75	5.82	4.1	5.58	3.5	2.68
11	1	2.71	4.42	5.26	4.6	4	4.77	3.68	3.66	4.33	2.72	1.86
12	0	2.5	5	9.29	3.77	4.28	3.9	4	3.66	3.94	2.4	1.2
13	2.25	3	3.75	5.83	3.72	4.07	4.07	3.58	3.5	3.83	3.28	2.77
14	2.4	2.25	2.1	3.35	3.88	3.18	4.8	4.08	4.22	4.4	3.16	2.78
15	3.2	2.66	2.12	3.94	3.7	3.57	3.6	3.07	3.6	2.57	5.45	4.33
16	3.6	3.5	3.4	3.2	2.9	3.92	5.35	4.5	3.61	3.18	6.8	5.2
17	2	3.45	4.9	3.72	4	4.23	3.31	5.55	3.11	3.91	4.8	3.4
18	2	3.3	4.6	3.58	3.38	4.06	4.72	3.91	4.6	3.42	5.16	3.58
19	1.6	3.11	4.62	3.5	5.23	4.84	4.27	3.8	4.66	3	3.9	2.75
20	2	2.33	2.66	3.87	3.88	4.38	4.41	3.81	3.36	3.4	3.42	2.71
21	3.83	4.26	4.69	3.16	3.27	3.91	3.87	4.3	3.66	3.11	6.86	5.35
22	4.38	2.7	1.02	4.73	4.56	4.36	3	4.1	3.92	3.75	3.71	4.05
23	5.15	3	0.85	4.37	4.84	3.5	3.9	3.8	4.08	3.33	4.08	4.62
24	4.11	4.6	5.09	4.22	4.09	4.08	4.18	2.64	3.81	3.12	6.17	5.14
25	2.5	3.44	4.38	3.62	3.3	3.8	4.81	4.12	3.6	3.83	4.15	3.33
26	3.66	2.5	1.34	3.22	4.25	4.4	5.41	4.25	4.75	3	4.71	4.19
27	1	3.125	5.25	3.85	4.11	3.84	4.86	3.8	3.71	3.37	3.38	2.19
28	2.5	3.33	4.16	4.11	4.5	3.53	4.27	3.87	4.12	3.87	3	2.75
29	2.42		2.42	4	4.23	4.5	3.27	4.25	3.81	2.77	3.52	2.97
30	2.4		2.4	4.21	3	3.56	4.2	3.58	3.91	4.83	3.66	3.03
31	3.14		3.14		4.38		3.81	4.125		3.61		3

La vitesse du vent mesurée à 10m du sol est donnée en *m/s*.

Annexe02

Éoliennes - Tableau comparatif

				
Modèle	Furlmatic 910	Air	Windseeker 502	Whisper 600
Fabricant	Marlec Engineering	Southwest Windpower	Southwest Windpower	World Power Technologies
Puissance nominale en watts	150	300	500-12 V 575-24 V	600
Vitesse nominale du vent	58 km/h	45 km/h	48 km/h	40 km/h
Vitesse de rotation (tr/min)	900	2000	2000	1100
Vitesse d'amorçage	6,4 km/h	8 à 11 km/h	8 km/h	11 km/h
Diamètre du rotor	1 m	1,2 m	1,6 m	2,2 m
Nombre de pales	6	3	2 ou 3	2 ou 3
Matériau des pales	nylon renforcé de fibre de verre	thermoplastique renforcé de fibre de carbone	tilleul d'Amérique	tilleul d'Amérique
Profil aérodynamique	aile	aile	aile	aile
Poussée latérale	0,45 kN	0,36 kN	0,45 kN	0,67 kN
Dispositifs de régulation	effacement latéral	décrochage aérodynamique	effacement vertical	effacement vertical
Vitesse de régulation	59 km/h	56 km/h	56 km/h	43 km/h
Mécanismes d'arrêt	aucun	freinage dynamique	aucun	freinage dynamique
Masse au sommet du pylône	17,3 kg	5,9 kg	9 kg	18 kg
Type de générateur	alternateur aimants permanents	alternateur aimants permanents	alternateur aimants permanents	alternateur aimants permanents 3 Φ

			
Modèle	Wind Baron 750	BWC 850	Whisper 1000
Fabricant	Wind Baron	Bergey Windpower	World Power Technologies
Puissance nominale en watts	750	850	1000
Vitesse nominale du vent	48 km/h	45 km/h	40 km/h
Vitesse de rotation (tr/min)	1100	520	935
Vitesse d'amorçage	8 à 11 km/h	12.8 km/h	11.2 km/h
Diamètre du rotor	2 m	2,5 m	3 m
Nombre de pales	3	3	2 à 3
Matériau des pales	tilleul d'Amérique	Fibre de verre	tilleul d'Amérique ou fibre de verre
Profil aérodynamique	aile	cambré	aile
Poussée latérale		1,1 kN	1,1 kN
Dispositifs de régulation	effacement vertical	effacement latéral	effacement vertical
Vitesse de régulation	56 km/h	56 km/h	43 km/h
Mécanismes d'arrêt	freinage dynamique	non	freinage dynamique
Masse au sommet du pylône	17 kg	39 kg	25 kg
Type de générateur	alternateur aimants permanents 3 \AA	alternateur aimants permanents 3 \AA	alternateur aimants permanents 3 \AA