

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique
PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat
en génie mécanique

Thème :

**Etude comparative des aéromoteurs pour un choix
approprié d'éolienne destinée à la production
de l'énergie électrique**

Encadré par :

M. MADANI Mohamed

Présenté par :

HASHATEL Achour

Promotion : 2003/2004

Remerciements

Je remercie mon enseignant et promoteur Monsieur Mohamed MADANI pour son soutien et ses précieux conseils.

Je remercie Monsieur Khaled AMEUR, chercheur au Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour son aide généreuse.

Je remercie également le président et les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail ainsi que le corps des enseignants du département génie mécanique.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon père qui m'a soutenu tout au long de mes études ;

A ma mère dont l'affection pour moi est sans limites ;

A mes sœurs à qui je souhaite la réussite dans les études et dans la vie ;

A mon petit frère Sofiane ;

A toute ma famille ;

A mes amis, Farid, Djamel, Mehmed, Reda Ramzi, Rabah et à

tout ceux que je n'ai pas cités ;

Achour

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique
PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en
génie mécanique

Thème :

**Etude comparative des aéromoteurs pour un choix
approprié d'éolienne destinée à la production
de l'énergie électrique**

Encadré par :

M. Mohamed MADANI

Présenté par :

HASHATEL Achour

Promotion : 2003/2004

Sommaire

Nomenclature

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Les énergies renouvelables

1.	Introduction.....	4
2.	Energie solaire	4
3.	Energie éolienne	5
4.	Energie hydraulique.....	6
5.	La biomasse	8
6.	La géothermie	9
6.1.	La géothermie de très basse énergie	10
6.2.	La géothermie de basse énergie.....	10
6.3.	La géothermie de moyenne énergie.....	10
6.4.	La géothermie de haute énergie.....	10
7.	Energie des mers.....	12
7.1.	L'énergie marémotrice	12
7.2.	L'énergie de la houle.....	12
7.3.	L'énergie thermique des mers	12
7.4.	L'énergie hydrolienne.....	13
8.	Piles à combustible	13
9.	Conclusion	13

Chapitre II : Le vent

1.	Introduction.....	16
2.	Origine du vent	16
3.	Vitesse du vent.....	18
4.	Mesurer le vent	19
4.1.	En direction	19
4.2.	En vitesse.....	19

5.	Variations du vent.....	19
5.1.	Variations cycliques	20
5.1.1.	Phénomènes saisonniers.....	20
5.1.2.	Phénomènes journaliers.....	20
5.2.	Variations instantanées.....	22
5.3.	Variation en fonction de l'altitude.....	22
5.4.	Influence du relief.....	23
6.	Energie du vent.....	24
6.1.	Energie récupérable par le rotor éolien.....	25
7.	Choix du site.....	26

Chapitre III : Généralités sur les aéromoteurs

1.	Historique	29
2.	Classification des éoliennes.....	31
2.1.	Caractéristiques du capteur.....	31
2.1.1.	Paramètre de vitesse.....	31
2.1.2.	Coefficient de puissance.....	31
2.1.3.	Coefficient de couple	31
2.2.	Aéromoteurs à axe horizontal.....	32
2.2.1.	Les moulins à vent.....	32
2.2.2.	Les éoliennes lentes.....	33
2.2.3.	Les éoliennes rapides	34
2.3.	Aéromoteur à axe vertical.....	35
2.3.1.	Machines à traînée différentielle.....	35
2.3.2.	Machines à écran.....	37
2.3.3.	Machine à clapets battants.....	37
2.3.4.	Machines à variation cyclique d'incidence	38
3.	Théorie de Betz.....	39
4.	Caractéristiques technologiques des éoliennes.....	42
4.1.	L'hélice.....	42
4.2.	La pale	43
4.2.1.	La longueur de la pale	43
4.2.2.	Le profil.....	43
4.2.3.	La largeur de la pale c	46
4.2.4.	Les matériaux	46
4.3.	Les supports d'aéromoteurs.....	46
4.3.1.	Les supports autoporteurs.....	47
4.3.2.	Les supports haubanés.....	47
4.4.	Dispositifs d'orientation	48
4.4.1.	Empennage	48
4.4.2.	Eolienne auxiliaire.....	49
4.4.3.	Orientation par servomoteur.....	50
4.5.	Dispositifs de protection et de régulation.....	51
4.6.	Le multiplicateur.....	57

4.7.	Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne.....	58
5.	Utilisation de l'énergie éolienne.....	61
5.1.	Production d'énergie mécanique.....	61
5.2.	Production d'électricité : Les aérogénérateurs.....	63
5.2.1.	Une nacelle.....	64
5.2.2.	Un pylône support d'aérogénérateur.....	66
5.2.3.	Un dispositif de stockage de l'énergie produite.....	67
5.2.4.	Un Dispositif de contrôle des batteries d'accumulateurs.....	67
5.2.5.	Une source de secours.....	67
6.	Conclusion.....	68

Chapitre IV : Etude aérodynamiques sur les aéromoteurs à axe horizontal

1.	Introduction.....	70
2.	Evaluation des actions aérodynamiques s'exerçant sur l'élément de pale.....	70
2.1.	Efforts de portance et de traînée.....	70
2.1.1.	Triangle des vitesses.....	72
2.2.	Etude de la poussée axiale et du couple moteur.....	74
3.	Calcul des paramètres géométriques de l'élément de pale.....	77
3.1.	La vitesse spécifique λ	78
3.2.	Le coefficient de puissance.....	79
4.	Organigramme schématique de calcul.....	80

Chapitre V : Résultats et discussions

1.	Exemple de calcul.....	85
1.1.	Profil NACA 4412 :.....	86
1.2.	Profil NACA 32024.....	87
1.3.	Profil S809.....	88
1.4.	Influence de la variation du nombre de Reynolds.....	89
1.5.	Influence du nombre de pales.....	90
1.6.	Influence de la puissance de sortie.....	91
1.7.	Influence de la vitesse du vent.....	92
2.	Conclusion.....	93
	Conclusion générale.....	94
	Références bibliographiques.....	95
	Annexes.....	97

Liste des figures

Fig 1.	<i>Parc éolien mondial.....</i>	<i>5</i>
Fig 2.	<i>Centrale hydraulique sous le barrage</i>	<i>7</i>
Fig 3.	<i>Microcentrale hydraulique</i>	<i>7</i>
Fig 4.	<i>Carte de température des sources thermales.....</i>	<i>11</i>
Fig 5.	<i>Directions des vents autour de la Terre.....</i>	<i>17</i>
Fig 6.	<i>Variation de la vitesse du vent durant l'année.</i>	<i>20</i>
Fig 7.	<i>Phénomènes journaliers près des côtes.</i>	<i>21</i>
Fig 8.	<i>Brise de pente.....</i>	<i>21</i>
Fig 9.	<i>Répartition de la vitesse du vent en fonction du relief.....</i>	<i>23</i>
Fig 10.	<i>Distance à respecter entre éolienne et obstacle.....</i>	<i>24</i>
Fig 11.	<i>Energie récupérable par l'aéromoteur.....</i>	<i>25</i>
Fig 12.	<i>Coupe d'un moulin à vent sur pivot.....</i>	<i>33</i>
Fig 13.	<i>Eolienne américaine</i>	<i>33</i>
Fig 14.	<i>Hélice au vent</i>	<i>34</i>
Fig 15.	<i>Hélice sous le vent</i>	<i>34</i>
Fig 16.	<i>Anémomètre à coupelles</i>	<i>36</i>
Fig 17.	<i>Eolienne Savonius.....</i>	<i>37</i>
Fig 18.	<i>Coupe de dessus de l'éolienne Savonius.....</i>	<i>37</i>
Fig 19.	<i>Machine à écran</i>	<i>38</i>
Fig 20.	<i>Machine à clapets battants</i>	<i>38</i>
Fig 21.	<i>Le rotor Darrieus.....</i>	<i>38</i>
Fig 22.	<i>Volume de contrôle autour du rotor</i>	<i>39</i>
Fig 23.	<i>Rendement de la puissance prélevée en fonction de a.</i>	<i>41</i>
Fig 24.	<i>Représentation d'un rotor éolien bipale.....</i>	<i>42</i>
Fig 25.	<i>Caractéristique géométrique de la pale.....</i>	<i>44</i>
Fig 26.	<i>Action de l'air sur l'élément de pale.....</i>	<i>45</i>
Fig 27.	<i>Eolienne avec un système d'empennage</i>	<i>49</i>
Fig 28.	<i>Orientation par éolienne auxiliaire (vue de dessus).....</i>	<i>50</i>
Fig 29.	<i>Dispositif à empennage articulé</i>	<i>52</i>
Fig 30.	<i>Système de régulation par effacement total ou partiel du rotor.</i>	<i>53</i>
Fig 31.	<i>Régulation par frein aérodynamique (système Windchanger).....</i>	<i>54</i>

Fig 32.	<i>Régulation par variation de l'angle de calage</i>	<i>55</i>
Fig 33.	<i>Variation de C_z/C_x en fonction de l'angle d'incidence</i>	<i>56</i>
Fig 34.	<i>Batterie d'accumulateur au plomb</i>	<i>59</i>
Fig 35.	<i>Carte annuelle de la vitesse du vent à 10m du sol (m/s).....</i>	<i>63</i>
Fig 36.	<i>Organigramme d'une section de fourniture d'énergie électrique par aérogénérateur</i>	<i>64</i>
Fig 37.	<i>Coupe de la nacelle d'un aérogénérateur (Vesta OptiSpeed)</i>	<i>65</i>
Fig 38.	<i>Représentation des efforts de portance et de traînée appliqués sur un élément de pale</i>	<i>71</i>
Fig 39.	<i>Triangle des vitesses</i>	<i>72</i>
Fig 40.	<i>Efforts aérodynamiques auxquels est soumis un élément de pale.....</i>	<i>74</i>
Fig 41.	<i>Relations géométriques entre les forces aérodynamiques</i>	<i>75</i>
Fig 42.	<i>Coefficient de puissance en fonction de λ.....</i>	<i>79</i>
Fig 43.	<i>Organigramme schématique du programme de calcul évaluant l'angle d'attaque et la corde de l'élément de pale.....</i>	<i>83</i>
Fig 44.	<i>Variation de l'angle de calage et de la corde en fonction de r pour un profil NACA 4412</i>	<i>86</i>
Fig 45.	<i>Profil de pale d'une NACA 4412</i>	<i>86</i>
Fig 46.	<i>Variation de l'angle de calage et de la corde en fonction de r pour un profil NACA 23024 ...</i>	<i>87</i>
Fig 47.	<i>Profil de pale d'une NACA 23024</i>	<i>87</i>
Fig 48.	<i>Variation de l'angle de calage et de la corde en fonction de r pour un profil S809</i>	<i>88</i>
Fig 49.	<i>Profil de pale d'une S809</i>	<i>88</i>
Fig 50.	<i>Variation de la corde et de l'angle d'attaque en fonction de r pour différentes valeurs du nombre de Reynolds pour un profil du type NACA 4412.....</i>	<i>89</i>
Fig 51.	<i>Variation de la corde et de l'angle d'attaque en fonction de r pour différents nombre de pales appliquée un profil du type NACA 4412.....</i>	<i>90</i>
Fig 52.	<i>Variation de la corde et de l'angle d'attaque en fonction de r pour des puissance aérodynamiques de sorties différentes appliquée un profil du type NACA 4412.</i>	<i>91</i>
Fig 53.	<i>Variation de la corde et de l'angle d'attaque en fonction de r pour des vitesses de vent différentes appliquée un profil du type NACA 4412.</i>	<i>92</i>

Liste des tableaux

Tab 1.	<i>Parc de production hydroélectrique en ALGERIE</i>	<i>8</i>
Tab 2.	<i>Effets du vent en fonction de sa vitesse (Echelle de beaufort).</i>	<i>18</i>
Tab 3.	<i>Exemple de dimensionnement de pylônes haubanés tubulaires.....</i>	<i>48</i>
Tab 4.	<i>Nombre de pales pour différentes vitesses spécifiques</i>	<i>78</i>

Nomenclature

Symbole	Unité	Définition
a	Sans dimension	Facteur d'interférence axiale
a'	Sans dimension	Facteur d'interférence tangentielle ou angulaire
B	Sans dimension	Nombre de pales
c	m	Corde du profil de la pale
C	Sans dimension	Coefficient aérodynamique total
C _p	Sans dimension	Coefficient de puissance
C _c	Sans dimension	Coefficient de moment
C _x	Sans dimension	Coefficient de Traînée.
C _z	Sans dimension	Coefficient de portance.
E ₀	Joules (J)	Energie cinétique du vent à la hauteur de référence
E _c	Joules (J)	Energie cinétique du vent
F _x	N	La force de traînée
F _z	N	La force de Portance
F _a	N	La poussée axiale
F _t	N	La poussée tangentielle
i	deg	Angle d'attaque ou d'incidence
h _r	m	Hauteur de référence du rotor
h	m	Hauteur effective du rotor
P	W	Puissance délivrée par le vent
Q	m ³ /s	Débit volumique de l'air
r	m	Rayon local
R	m	Longueur de la pale
\dot{m}	kgs	Débit-masse du vent à travers l'éolienne
S	m ²	Surface du cercle balayé par la pale
t	s	Temps
u	m/s	Vitesse tangentielle du sillage
U	m/s	Vitesse tangentielle du rotor
V ₀	m/s	Vitesse du vent
V	m/s	Vitesse axiale au niveau du rotor
V _r	m/s	Vitesse du vent à la hauteur de référence
V ₂	m/s	Vitesse du sillage

Symbole	Unité	Définition
α	deg	Angle de calage du profil de pale
λ	Sans dimension	Vitesse spécifique
λ_r	Sans dimension	Vitesse spécifique à la distance r du moyeu
ν	m^2/s	Viscosité cinématique de l'air
ρ	Kg/m^3	Masse volumique de l'air
φ	deg	Angle d'inclinaison
Ω	rad/s	Vitesse angulaire du rotor
ω	rad/s	Vitesse angulaire du sillage

ملخص :

الموضوع: دراسة مقارنة لناعورة هوائية من اجل الاختيار المناسب لإنتاج الطاقة الكهربائية.
الملخص: في إطار تقديم مذكرة التخرج, يتركز عملنا هذا على عرض و مقارنة بين المحركات الهوائية, و على هذا الأساس يتعين لنا اختيار الناعورة الهوائية الملائمة لإنتاج الطاقة الكهربائية.
ولغرض تسهيل الحسابات في هذا الميدان, قمنا بوضع برنامج معلوماتي يسمح لنا بتعيين الخصائص الهندسية لشفرة المروحة.
كلمات مفتاحية: ناعورة هوائية, سرعة نوعية, القوة الحاملة, القوة المقاومة, الحبل, زاوية الالتواء.

Résumé :

Sujet : Etude comparative des aéromoteurs pour un choix approprié d'éolienne destinée à la production de l'énergie électrique.

Dans le présent rapport, notre travail consiste en une présentation et une étude comparative des aéromoteurs, qui se finalisent par un choix d'éolienne pour la production d'électricité.

Un programme de calcul a été élaboré nous permettant de déterminer, à partir de données aérodynamiques, les caractéristiques géométriques des pales.

Mots-clés : Eolienne, portance, traînée, profil, corde, angle de vrillage.

Abstract:

Subject: Comparative study of aero-engines for a suitable choice of wind turbines intended for the production of electric energy.

In this report, our work consists of a presentation and a comparative study of aero-engines, which are finalized by a choice of a wind turbine for production of electricity.

A calculation programme was elaborated which enables us to determine, starting from aerodynamic data, geometric characteristics of blades.

Key words: Wind turbine, lift, drag, profile, cord, angle of twist.

Introduction générale

L'énergie éolienne a toujours apportée sa contribution aux besoins énergétiques de l'Homme, sous forme mécanique puis sous forme d'électricité, elle anime même une part de plus en plus grande de nos loisirs. Cette contribution a toujours fluctué au gré du coût des autres formes d'énergie et de la technologie, mais elle n'a jamais complètement disparu. Depuis une quinzaine d'années, elle s'impose même comme une énergie susceptible de contribuer de façon non marginale au bilan énergétique mondial, avec des machines de plus en plus fiables, et dont les coûts d'investissement et de fonctionnement débouchent sur un prix du kWh produit compétitif avec d'autres sources.

La recherche dans le domaine des énergies renouvelables est devenue un des axes les plus importants, non seulement ces sources d'énergies sont inépuisables et généralement gratuites, comme le solaire et le vent, mais c'est aussi un moyen qui permet de préserver l'environnement, qui est une délivrance d'importance majeure et conduit donc au développement durable du pays.

L'énergie éolienne est l'un des pôles les plus actifs de la famille des énergies renouvelables. En effet, la puissance installée du parc mondial éolien durant les années 90 représente une croissance annuelle moyenne de 22 %, ce qui est considérable, la puissance installée dans le monde a atteint les 15 GW en 2000, qui correspond à une production d'énergie de 27 TWh/an.

Les caractéristiques aérodynamiques des aéromoteurs sont étroitement liées à la géométrie de leurs pales. L'innovation et le développement technologiques dans le domaine de l'aéronautique ont favorisés l'évolution de la branche de l'énergie éolienne, si bien que les profils de pales utilisés sont quasiment les mêmes que ceux utilisés sur les hélices d'avions et d'hélicoptères.

Le présent travail a pour objectif principal la détermination des caractéristiques géométriques des pales d'aérogénérateurs afin d'utiliser la machine de façon optimale. Pour parvenir aux objectifs escomptés, on présentera en premier lieu les différentes éoliennes existantes, en décrivant minutieusement les avantages de chaque configuration, ensuite on passera à la partie dimensionnement aérodynamique, où il sera question d'élaborer un programme de calcul qui permettra de déterminer l'envergure de l'hélice, ainsi que la corde et l'angle d'attaque de chaque

section de la pale tout en prenant soin de maintenir un coefficient de puissance à son maximum. Des exemples, mis en œuvre dans le chapitre V, nous permettront d'évaluer la différence entre les performances de plusieurs profils en fonction de la puissance de sortie ou bien de la vitesse du vent, ainsi on pourra conclure à un choix de modèle approprié, à adopter pour la construction d'un aérogénérateur.

Chapitre I

Les énergies renouvelables

1. Introduction

Les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergie d'origine naturelle tel que le rayonnement solaire, l'énergie des vents, les cycles de l'eau et du carbone dans la biosphère, le flux de chaleur interne de la Terre, l'effet de l'attraction lunaire et solaire sur les océans. Elles s'opposent ainsi aux énergies fossiles, dont les stocks forcément limités se sont constitués lors de la formation du système solaire (uranium, thorium), ou, au cours des âges géologiques, à partir d'une fraction infime de la biomasse terrestre qui a pu se fossiliser (charbon, pétrole, gaz naturel). On englobe aussi dans les énergies renouvelables les flux de déchets de l'activité économique qui peuvent donner lieu à une valorisation énergétique : déchets de l'agriculture et de l'exploitation forestière, part combustible ou fermentescible des déchets industriels et des ordures ménagères. Elles n'ont que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux. Elles peuvent toutefois avoir des impacts visuels, sonores ou sur la faune ou la flore. Leur utilisation doit donc répondre à certains principes et réglementations pour limiter ces impacts locaux.

Plusieurs critères peuvent être pris en compte pour évaluer la valeur d'un type d'énergie, par exemple la puissance susceptible d'être extraite qui est généralement limitée, le coût de l'installation, le coût de revient de l'énergie, la disponibilité de la source , etc.

2. Energie solaire

L'énergie solaire permet d'assurer des conditions de température favorables à la vie et anime les cycles de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère. Mais elle peut aussi être utilisée directement pour produire de la chaleur à différents niveaux de température pour divers usages : chauffage et climatisation de locaux, séchage de produits agricoles, production d'eau chaude et de vapeur, production d'électricité par le biais de cycles thermodynamiques. La production d'électricité peut être aussi obtenue directement par la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire au moyen des photopiles (appelées aussi « cellules solaires »).

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants au Monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie

reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays [8].

3. Energie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique de l'air en déplacement dans une veine de vent. Sa transformation en énergie mécanique se fait au moyen d'éoliennes. Cette énergie peut être utilisée directement pour le pompage de l'eau, ou la mouture de grains. Lorsque ces éoliennes sont équipées d'un générateur électrique, on les appelle des aérogénérateurs. Plusieurs de ceux-ci peuvent être regroupés sur un même site pour former un « parc d'aérogénérateurs » constituant une « centrale éolienne », appelée aussi une « ferme éolienne ».

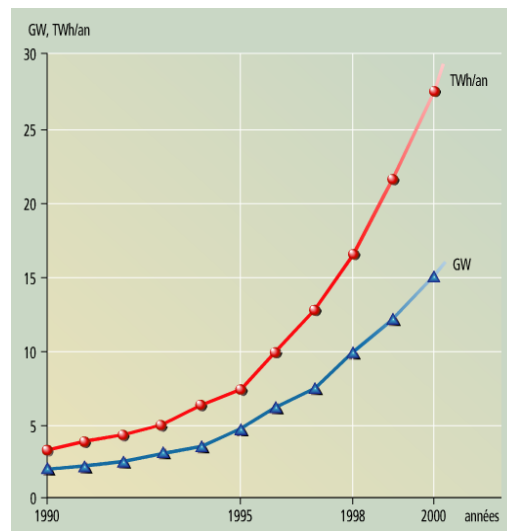


Fig 1. Parc éolien mondial

L'application de l'énergie éolienne est multiple :

- La principale est le couplage de l'aérogénérateur sur les grands réseaux électriques interconnectés, on utilise dans ce cas les aéromoteurs rapides. C'est la filière où, jusqu'à présent, le plus de recherches et d'expériences ont été réalisées. Elle devient actuellement la source d'énergie primaire qui croît le plus rapidement dans le monde. En effet, la puissance

installée du parc mondial éolien a été multipliée par cinq depuis 1990 pour atteindre les 10 gigawatts au début de 1999, ce qui représente une croissance annuelle moyenne de 22% [6].

- Le pompage d'eau au moyen d'éoliennes multipales, répandu dans les pays ou les zones agricoles ne disposant pas de réseau électrique dense tel le sud Algérien.
- L'alimentation de petits réseaux électriques isolés par des systèmes hybrides éolien-Diesel, où des aérogénérateurs de 10 à 100 kW peuvent produire une part importante de l'énergie annuelle, l'autre partie sera assurée par un moteur Diesel par exemple.
- La recharge de batteries pour fournir de l'électricité de base (éclairage, radio, petit poste de télévision) à une famille isolée, au moyen de petits aérogénérateurs de moins de deux mètres de diamètre.

L'Algérie à un régime de vent modéré (2 à 6 m/s). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux ou pour des installations éoliennes dans le sud qui dispose de vitesses de vent dépassant les 6 m/s, notamment dans la région sud ouest [7].

4. Energie hydraulique

C'est l'énergie potentielle de l'eau en altitude qui coule jusqu'au niveau de la mer par effet de la gravitation terrestre. Elle est issue du cycle de l'eau dans la biosphère, une partie de ces précipitations forment les rivières et les fleuves. L'énergie potentielle de ces précipitations entre leur point de chute sur les continents et le niveau de la mer est de l'ordre de 80 000 TWh/an. Sur ce total, le potentiel techniquement exploitable est de l'ordre de 15 000 TWh/an, alors que seulement 2 300 TWh/an sont actuellement exploités sous forme d'électricité produite par des centrales hydroélectriques [1].

Les gisements hydrauliques sont surtout situés dans les régions humides et les montagnes. Le principe consiste à capter l'eau en amont, à diriger l'eau en aval pour faire tourner une turbine. L'énergie mécanique ainsi produite pourra servir immédiatement (par exemple pour décortiquer le riz ou à produire de l'électricité).

La puissance disponible dépend de deux facteurs : la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau. Deux types de solutions sont possibles, selon la configuration du site :

- Sur les grands fleuves ou au bas des montagnes, on construit un barrage. Il retient l'eau (c'est le fameux lac de barrage, comme à Serre-Ponçon crée une chute d'eau artificielle (Figure 2).

L'eau s'engouffre au bas du barrage, passe dans une sorte de galerie au bout de laquelle se situent les turbines. Le passage de l'eau fait tourner les hélices qui entraînent un alternateur. C'est ce dernier qui produit le courant.

- Sur les petites rivières, on met en place des microcentrales (Figure 3) qui ne barrent pas le cours d'eau : un petit canal est construit, où une partie de l'eau s'engouffre et va faire tourner les turbines de la centrale au fil de l'eau.

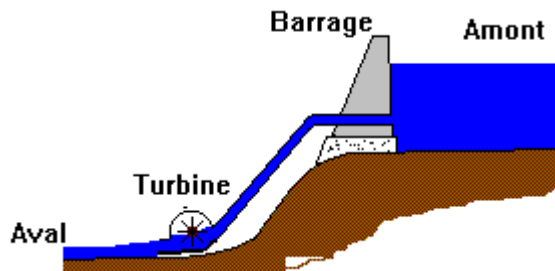


Fig 2. Centrale hydraulique sous le barrage

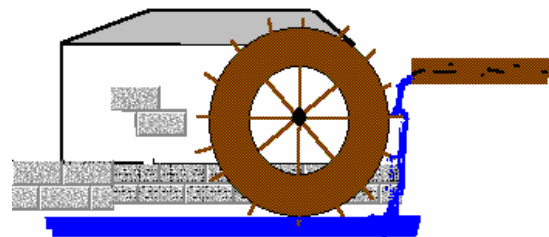


Fig 3. Microcentrale hydraulique

Les quantités globales pluviales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement elle profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer. Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface [9].

103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation [8].

Tab 1. Parc de production hydroélectrique en ALGERIE

Centrale	Puissance installée en MW
Darguina	71.5
Ighil Emda	24
Mansouria	100
Erraguene	16
Souk El DJEMAA	8.085
Tizi MEDEN	4.458
IGHZERNCHEBEL	2.712
GHRIB	7.000
GOURIET	6.425
BOUHANIFIA	5.700
OUED FODDA	15.600
BENI BEHDE	3.500
TESSALA	4.228

5. La biomasse

Ce terme générique désigne, en fait, toute matière d'origine organique. Dès lors, les utilisations énergétiques de la biomasse recouvrent un grand nombre de techniques. Globalement, on peut utiliser la biomasse de trois façons différentes : en la brûlant, en la faisant pourrir ou en la transformant chimiquement.

- La brûler, c'est s'en servir comme d'un combustible de chaudière. On utilise aussi bien des déchets de bois, de récoltes que certains déchets, comme les ordures ménagères, les déchets industriels banals ou certains résidus agricoles.
- En se décomposant, sous l'effet des bactéries, certains déchets putrescibles (comme certaines boues de stations d'épuration des eaux usées ou la fraction organique des déchets ménagers, les épluchures par exemple) produisent du biogaz. Ce mélange de gaz est en majorité composé de méthane, utilisable, une fois épuré, pour alimenter, lui aussi, des chaudières ou des véhicules fonctionnant au GNV (Gaz Naturel Véhicule).

- Enfin, certaines cultures, comme le colza, les betteraves ou certaines céréales, telles que le blé, peuvent être transformés en biocarburant. L'huile de colza transformée est un excellent substitut au gazole. Alors que la transformation chimique des céréales ou de la betterave peut fournir de l'ETBE*, un additif qui, ajouté à l'essence, permet de réduire certaines émissions polluantes de nos voitures.

La récupération de certains objets ou matériaux, à défaut de produire directement de l'énergie, permet d'en économiser: par exemple, les bouteilles de verre récoltées grâce au tri sélectif économise de la matière première (sable et calcaire principalement), et aussi l'énergie nécessaire pour élaborer le verre car le calcin résultant du recyclage du verre fond à 1000 °C au lieu de 1500 °C pour le mélange des matières premières. De plus, l'environnement y trouve son compte.

Le potentiel en biomasse actuel en ALGERIE est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes équivalent pétrole), le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%. 5 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés, ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de tep/an [8].

6. La géothermie

Le noyau de la Terre émet un flux de chaleur provenant de son refroidissement résiduel et de la radioactivité de certains éléments tels que l'uranium, thorium, potassium, etc. Le flux moyen résultant de ces activités est de 60mW/m² [2]. Mis à part les manifestations naturelles parfois violentes que constituent les volcans, cette chaleur se propage vers la surface, et chauffe des nappes aquifères situées entre 500 et 2 000 m de profondeur. Ce sont les nappes les plus profondes qui sont portées à la température la plus élevée; le gradient géothermique, qui est de l'ordre de 3 °C par 100 m, peut atteindre 100 °C par 100 m dans les zones limites de plaques. Ce gradient dépend de la conductivité thermique des roches et du flux géothermique qui est de l'ordre de 0,05 W/m², soit environ 4 000 fois moins que la valeur moyenne du flux solaire (200 W/m²) [3]. Les fortes valeurs sont expliquées par la présence, à quelques milliers de mètres sous la surface de la terre, de roches chaudes correspondant, soit à des poches magmatiques liées à des phénomènes volcaniques actuels ou assez récents, soit à une remontée locale du manteau (partie

* ETBE : Ethyltertiobutyléther, obtenu à partir de 45 % d'éthanol et de 55 p. 100 d'isobutylène

du globe terrestre, intermédiaire entre le noyau et l'écorce, épaisse de 3.000 km, d'une densité voisine de 5) dont la profondeur habituelle varie de 70 à 2.900 km.

Suivant la profondeur des nappes et la température de l'eau disponible, on distingue la géothermie de très basse, basse, moyenne, et haute énergie.

6.1. La géothermie de très basse énergie

Elle est susceptible de fournir une eau à une température comprise entre 30 et 50 °C, suffisante pour assurer le chauffage de serres, et de piscines, et même le chauffage des locaux à condition de le compléter par l'appoint d'une autre source d'énergie. Étant donné la faible profondeur des nappes, les coûts de forage sont peu élevés; la Maison de la Radio à Paris est ainsi chauffée.

6.2. La géothermie de basse énergie

Elle exploite des nappes plus profondes: entre 1 500 et 2 000 m, et fournit de l'eau à des températures situées entre 50 et 90 °C, directement utilisable pour le chauffage. Le plus souvent, ces eaux sont fortement minéralisées, ce qui oblige à les réinjecter dans la nappe après extraction de l'énergie, et entraîne une augmentation des coûts d'exploitation; mais cela a l'avantage de maintenir constants la pression du réservoir ainsi que le débit. En 1995, la puissance installée mondiale était de 4.1 GW thermiques.

6.3. La géothermie de moyenne énergie

Les nappes de moyenne énergie sont situées entre 2 000 et 2 500 m de profondeur et fournissent de l'eau entre 90 et 150 °C. En France, les principaux gisements sont en Alsace et dans les Limagnes. Mis à part le chauffage, ces nappes pourraient être utilisées pour produire de l'électricité par le biais de l'évaporation d'un fluide organique à bas point d'ébullition (ammoniac ou isobutane par exemple).

6.4. La géothermie de haute énergie

C'est une ressource liée au volcanisme; elle fournit de la vapeur ou de l'eau sous pression à une température comprise entre 150 et 350 °C (170 à 200 °C à Larderello en Italie, près de Pise, ou dans les champs des geysers en Californie) qui peut être directement utilisée pour actionner un turbo-alternateur. La puissance totale disponible à l'échelle mondiale est estimée à 300 000 MW,

et actuellement 6 000 MW sont installés dont 45 % aux Etats-Unis [4]. Les coûts d'installation et d'exploitation sont réduits et le kilowatt produit est moins cher que celui obtenu par les combustibles fossiles.

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysiques a permis de tracer une carte géothermique préliminaire (Fig.4). Plus de deux cent (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra [8].

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m :

- Zone de Relizane et Mascara
- Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa
- Zone de Guelma et Djebel El Onk

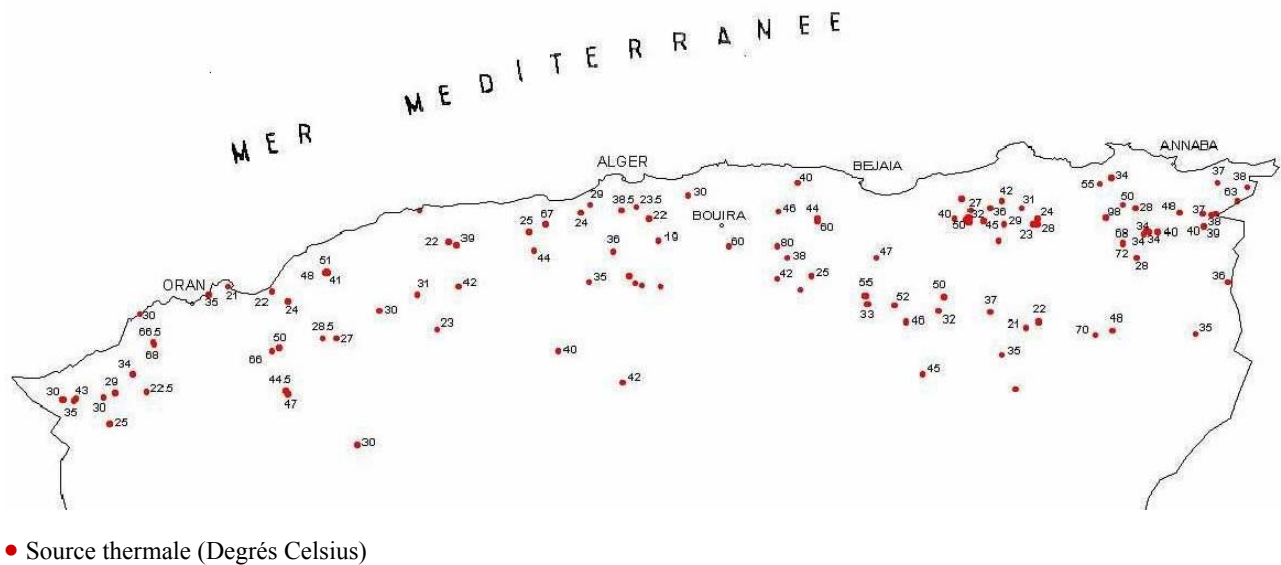


Fig 4. Carte de température des sources thermales

7. Energie des mers

Les océans et les mers peuvent être considérés comme des sources potentielles d'énergie renouvelable, qui peut se présenter sous différentes formes : énergie marémotrice, énergie des vagues, énergie thermique des mers.

7.1. L'énergie marémotrice

Elle est principalement due à la différence d'attraction lunaire entre les océans situés du côté et à l'opposé de la Lune à un instant donné. Ce n'est que dans des sites où se produit une amplification du mouvement moyen de la hauteur des océans (au-delà de 5 m environ) que l'énergie marémotrice peut être exploitée industriellement. En tenant compte de cette contrainte, le potentiel technique mondial d'énergie marémotrice est de l'ordre de 250 GW, dont 15 GW en France et 18 GW au Royaume-Uni [5]. Une autre contrainte est la limitation à un maximum de 25% de la durée de fonctionnement équivalent à pleine puissance de la centrale sur l'année, à tout ceci s'ajoute la nécessité de travaux maritimes et de matériaux résistant à la corrosion marine qui renchérissent le coût des investissements. Cependant, la faisabilité technique et économique de centrales marémotrices a été prouvée dans différents sites tel l'estuaire de la Rance (Bretagne), et l'énergie produite devient à long terme compétitive avec l'énergie issue de sources fossiles.

7.2. L'énergie de la houle

L'énergie de la houle et des vagues peut être exploitée par des dispositifs à terre ou en mer. Différents procédés ont été expérimentés pour récupérer l'énergie des vagues : caissons flottants, radeaux articulés, colonnes oscillantes. Ainsi de nombreux prototypes de quelques kilowatts à 2 MW (Osprey, 1995) ont été testés au titre de la recherche et développement, mais aucun n'a pu encore atteindre le stade des essais industriels pour évaluer les paramètres fondamentaux, qui sont la productivité moyenne sur de longues périodes et le montant des coûts d'exploitation, deux facteurs particulièrement difficiles à cerner dans le cas des installations offshore.

7.3. L'énergie thermique des mers

Le gradient de température de 15 à 20 °C entre la surface des océans intertropicaux et les eaux profondes froides peut théoriquement être exploité pour produire de l'énergie via un cycle thermodynamique. Le rendement de Carnot qui en résulte est inférieur à 7%, et les débits d'eau à

l'évaporateur et au condenseur sont très élevés, ce qui entraîne des consommations élevées pour les auxiliaires. Tous les essais faits (Georges Claude à Cuba, États-Unis et Hawaii dans les années 1980) ont débouché sur la démonstration de la faisabilité de ce concept, mais aussi sur sa fragilité et son coût beaucoup trop élevé.

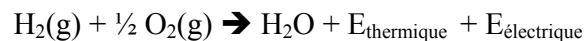
7.4. L'énergie hydrolienne

C'est la transformation en énergie mécanique puis électrique de celle des courants marins. Ce sont des installations en offshore peut profond (à moins de 10 m de profondeur et à moins de 10 km des côtes).

Les expériences déjà menées (Danemark, Pays-Bas) et en cours (Royaume-Uni), ainsi que l'analyse économique et le potentiel disponible (par exemple 97 TWh/an pour la France) [6], donnent à penser que, grâce à cette application, les océans seront à moyen terme une source d'électricité intéressante et importante, notamment pour l'Europe.

8. Piles à combustible

La pile à combustible (PAC) est un générateur d'électricité qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique, par une réaction d'oxydoréduction. La pile à combustible fonctionne selon le mode inverse de l'électrolyse de l'eau.



Dans sa structure et fonctionnement, la pile à combustible est simple ; une pile est un empilement de plusieurs dizaines de cellules des très faible épaisseur dont chacune est constituée de deux électrodes et un électrolyte liquide ou un polymère. La différence des autres piles électrochimiques à fonctionnement classique réside dans le fait que les réactifs sont renouvelés, les électrodes ne sont pas consommables, pas de déchets et n'utilisant pas de substances toxiques. Le rendement des piles à combustible est voisin de 60%, le prix de revient très élevé réserve, pour l'instant, ce procédé aux missions spatiales de longue durée.

9. Conclusion

L'un des problèmes cruciaux auquel l'humanité doit faire face est celui de la pollution, spécialement celui du réchauffement de la terre provoqué par la présence anormale dans l'atmosphère de certains gaz (comme le gaz carbonique et le méthane). La température de la

planète a augmentée plus vite en cent ans que lors des dix mille dernières années. Le groupement intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est parvenu à la conclusion que la planète s'est déjà réchauffée d'un demi degré depuis le début du XX^e siècle et prévoit une augmentation de 1 à 5°C de la température pour les prochaines années.

L'origine principale de cette évolution exponentielle des gaz à effets de serre est l'utilisation des sources fossiles comme matière première dans les activités industrielles.

Ainsi, une utilisation sobre et efficace des ressources et l'intégration des énergies renouvelables dans tous les secteurs économiques mèneront à ce qu'on appelle le développement durable.

Le développement durable (*sustainable development*) a été défini lors du Sommet de la Terre de Rio (juin 1992) comme un développement qui répond « aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins ». Un tel développement passe inexorablement par une politique énergétique s'appuyant sur les énergies renouvelables comme source complémentaire.

L'Algérie n'est pas en marge de cette préoccupation, plusieurs efforts sont développés pour assurer une efficacité énergétique.

L'intégration des énergies renouvelables dans la politique énergétique nationale est très avantageuse pour notre pays car :

- Elle va permettre de valoriser nos gisements en énergie renouvelable tel le solaire et l'éolien.
- Elle va engendrer une utilisation plus rationnelle de nos réserves en hydrocarbures qui seront consacrées à l'exploitation pour le renforcement de nos entrées en devises.
- Sans oublier le respect de l'environnement et la diminution des émissions de gaz à effets de serre qui sont des objectifs à l'échelle nationale et internationale et qui ont fait l'objet de nombreux rassemblements tel la conférence de Kyoto en 1997.

Dans ce chapitre, on a fait le point sur les principales sources ainsi que le potentiel mondial d'énergies renouvelables, les différents domaines dans lesquels ces énergies peuvent être exploitées, on a également mis en évidence le gisement algérien en énergie propre.

Dans ce qui suit, on s'intéressera à une des formes d'énergies renouvelables qui est l'énergie éolienne dont les capacités mondiale et nationale ne sont guère négligeables.

Chapitre II

Le vent

1. Introduction

Le but de ce chapitre n'est pas de traiter de façon approfondie les différents phénomènes atmosphériques et en particulier le vent, ceci est fait dans les ouvrages spécialisés [10], [11]. Nous aborderons uniquement les principales caractéristiques du vent utiles à l'étude des aéromoteurs tel que sa vitesse, sa direction, ses variations cycliques et instantanées, ainsi que les sites favorables à l'implantation de parcs éoliens en fonction de ces différents paramètres, après avoir rappelé l'origine du vent.

2. Origine du vent

Le vent est défini comme étant de l'air en mouvement, dû aux variations de pression et de température de l'atmosphère en divers points de la surface du globe. Le rayonnement solaire est uniforme, mais près du pôle, il se répartit sur une plus grande surface qu'à l'équateur, la composition des couches d'air et le degré d'absorption et de réémission des sols et des mers différent, il en résulte des zones de basses pressions (ou dépression), où l'air plus chaud, est moins dense, et des zones de hautes pressions (où anticyclones), où l'air est plus froid, donc plus dense. Pour revenir à une position d'équilibre, un déplacement d'air doit s'opérer des régions de hautes pressions vers les régions de basses pressions, plus ces différences de pressions sont importantes, plus le courant d'air compensateur (le vent) est fort.

Du fait de la rotation de la Terre sur elle même, la direction du vent est alors modifiée, elle devient parallèle aux isobares au lieu de leurs être perpendiculaire. Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens trigonométrique autour des aires cycloniques et dans le sens des aiguilles d'une montre autour des aires anticycloniques. L'existence de cette force déviante a été mise en évidence par le mathématicien français Gaspard Gustave CORIOLIS (1792 – 1843).

Dans l'hémisphère Sud, les sens sont inversés par rapport au Nord.

Cependant, les différents phénomènes agissant sur le globe terrestre engendrent des zones à hautes pressions permanentes d'où l'air arrive (les zones polaires et péritropicales Nord et Sud) et de zones à basse pressions permanentes (zones équatoriale et zones arctique et antarctique) où règne un calme relatif vers lesquelles se dirigent les vents.

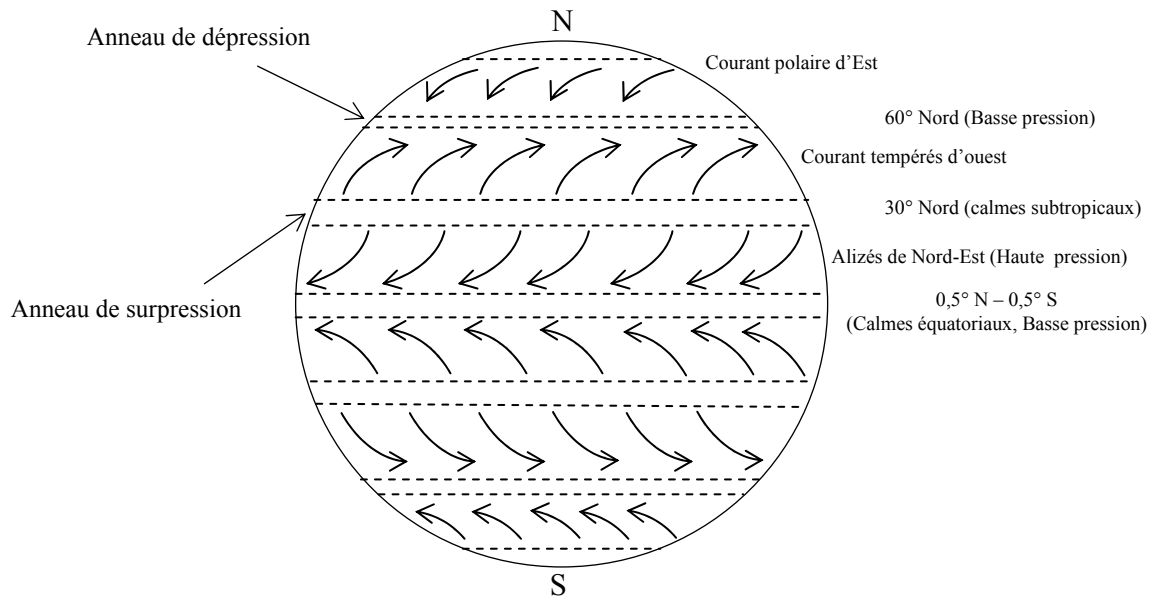


Fig 5. Directions des vents autour de la Terre.

Comme on peut le voir sur la figure 5, la Terre est entourée d'anneaux de surpressions et de dépressions (sept en tout) : Aux deux pôles règne un régime de vents dirigés de l'intérieur vers la côte. Au-delà des cercles polaires les vents dominants sont de l'Est. Dans les zones tempérées entre 30° et 60° de latitude soufflent les grandes brises d'Ouest (Sud-Ouest dans l'hémisphère Nord et Nord-Ouest dans l'hémisphère Sud). Enfin la région tropicale de part et d'autre de l'équateur est divisée par la zone des calmes et des basses pressions équatoriales.

Ces mouvements circulaires autour des dépressions et des anticyclones ne sont réellement observés qu'en altitude. Au niveau du sol, les forces de frottement, le relief et les obstacles éventuels (immeubles, arbres, etc.) perturbent les trajectoires du vent, ils se transforment en spirales qui ont tendance à faire dévier l'air des anticyclones vers l'extérieur et à le faire rentrer dans les dépressions [12].

3. Vitesse du vent

La vitesse du vent peut s'exprimer en mètres par seconde, en kilomètres par heure, en miles¹ par heure, en nœuds² (miles marins par heure) ou en degrés Beaufort qui est une échelle établie en fonction des influences physiques que le vent peut engendrer sur l'entourage.

Tab 2. Effets du vent en fonction de sa vitesse (Echelle de beaufort).

Degrés Beaufort	Vitesse (km/h)	Nature du vent	Effet en mer	Effet à terre
0 – 1	0 à 5	Calme	Calme	La fumée s'élève verticalement
2	6 à 11	Légère brise	Vaguelette ne déferlant pas	Perception du souffle du vent sur le visage
3	12 à 19	Petite brise	Les moutons apparaissent	Feuilles agitées
4	20 à 28	Jolie brise	Petites vagues, nombreux moutons	Poussières et papiers soulevés
5	29 à 38	Bonne brise	Vagues modérées, moutons, embruns	Arbustes se balances
6	39 à 49	Vent frais	Grandes vagues, crêtes d'écumes, embruns	Fils électriques qui bougent, usage des parapluies difficile
7 – 8	50 à 74	Grand frais	Lames déferlantes, traînées d'écumes	Arbres agités, peine à marcher contre le vent, branches brisées
9	75 à 88	Fort coup de vent	Lame déferlantes, grosse à énorme, les embruns réduisent la visibilité	Légers dégâts aux constructions
10	89 à 102	Tempête	Très hautes vagues déferlantes, surface de l'eau toute blanche, visibilité très faible	Les arbres sont déracinés, graves dégâts aux constructions
11	103 à 117	Violente tempête		Ravages étendus
12	118 à 133	Ouragan		
13 – 17	134 et plus	Cyclone		

¹ 1 mile : 1609 m.

² Une vitesse de un nœud signifie que le bateau parcourt un mile nautique (soit environ 1 852 m) en une heure.

On remarque que la vitesse du vent peut avoir des valeurs importantes et des conséquences néfastes sur les habitations et l'entourage.

Les vitesses maximales les plus élevées se rencontrent dans les cyclones tropicaux (des vitesses de 150 à 200 km/h ne sont pas exceptionnelles) [13].

4. Mesurer le vent

4.1. En direction

La direction du vent est repérée par le côté d'où il souffle, cette direction nous est indiquée par la girouette. Son origine est peu précise, perchée au sommet des clochers des églises, elle indiquait la direction du vent aux habitants du village.

A partir du XVIII^e siècle, quelques améliorations furent apportées à l'appareil. C'est ainsi que l'on vit apparaître la rose des vents ainsi que le repère orthonormé indiquant les quatre points cardinaux, Nord, Est, Sud, Ouest.

4.2. En vitesse

La vitesse du vent est mesurée par des anémomètres, il en existe plusieurs types, on peut les classer en deux catégories principales : Les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression, mais le plus répandu est l'anémomètre à coupelles, il peut être à main à lecture directe, fixe à lecture déportée, dans ce cas, les relevés de vitesse devront être faits à heures fixes en respectant les mêmes conditions de mesurage sur un site suffisamment dégagé, la hauteur est conventionnellement de 10 m.

L'anémomètre peut être relié à un enregistreur graphique dont on dépouillera les bandes.

5. Variations du vent

Le vent varie considérablement en direction et en vitesse, ceci dépend non seulement du gradient de pression local entre les régions voisines du globe, mais aussi aux forces physiques résultant de la rotation de la Terre (force de Coriolis), à la présence des océans, des continents et de leurs reliefs respectifs.

5.1. Variations cycliques

5.1.1. Phénomènes saisonniers

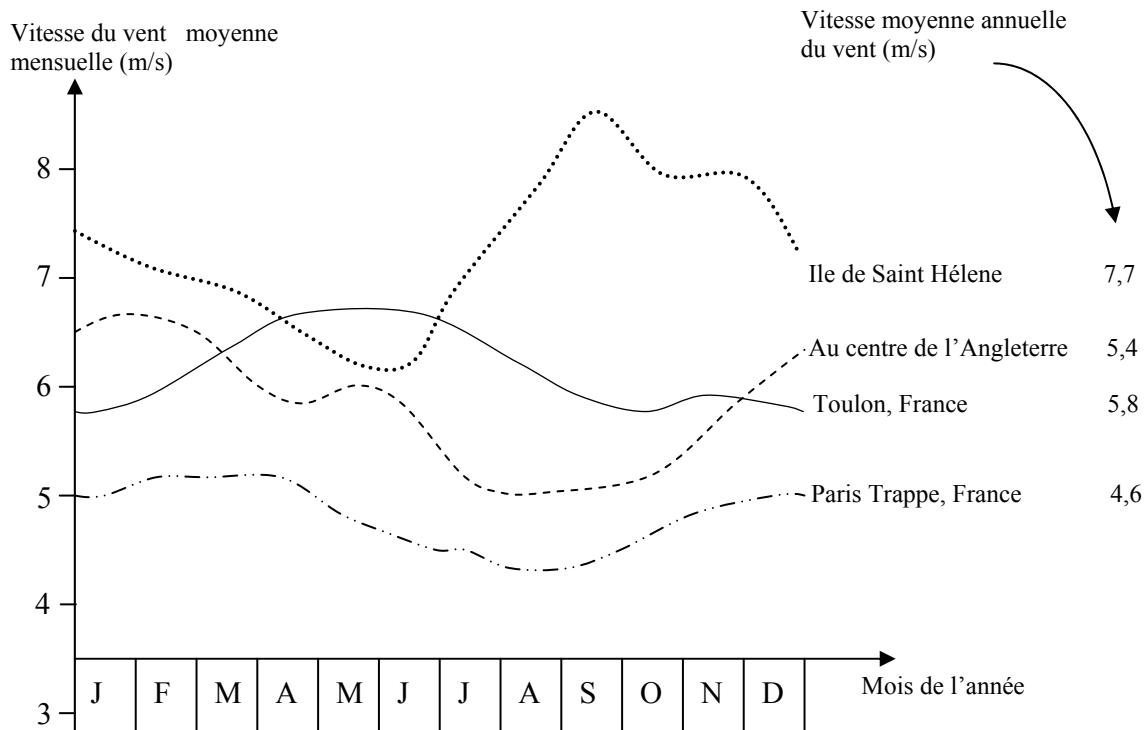


Fig 6. Variation de la vitesse du vent durant l'année.

Les relevés de l'Organisation Mondiale Météorologique, montrent que le vent est assez régulier d'une année sur l'autre. Durant l'année il est généralement fort au printemps et en hiver, moins fort en été, par exemple, pour la région de Toulon, en Mars, la vitesse moyenne est de 6,6m/s et qu'en Août elle est de 5,2m/s, ce qui signifie une perte de puissance de 50% en été par rapport à l'hiver (figure 6) [14]. Cependant, des exceptions peuvent être remarquées, un exemple est l'Ile de Saint Hélele.

5.1.2. Phénomènes journaliers

Les vents subissent les fluctuations journalières qui sont dues à des effets convectifs.

La chaleur spécifique du sol étant inférieure à celle de l'eau, durant le matin, la terre s'échauffe plus rapidement que la mer sous l'effet du rayonnement solaire, de ce fait il se crée un courant convectif plus important sur terre, il en résulte un appel d'air au voisinage des rives, c'est la brise

de mer. Le soir, la terre se refroidit plus rapidement que la mer, pour assurer un équilibre, la brise de terre souffle de la terre vers la mer (figure 7).

Ce phénomène se fait sentir jusqu'à 50 km des côtes et autour des grands lacs.

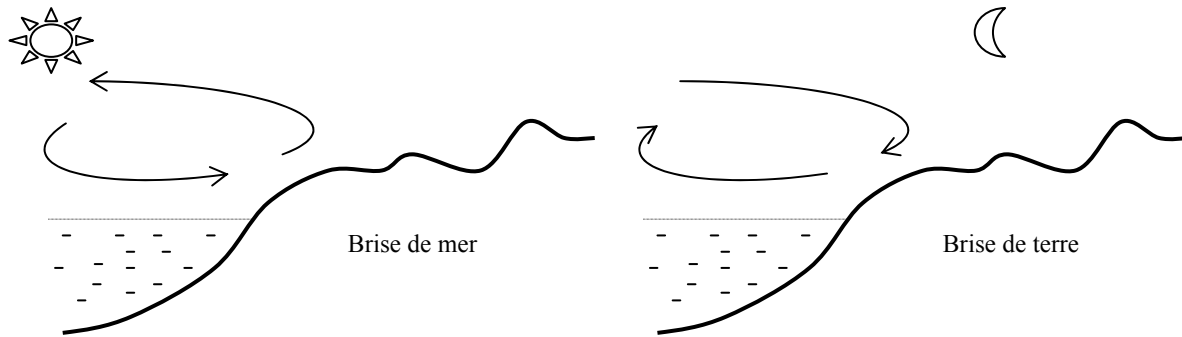


Fig 7. Phénomènes journaliers près des côtes.

Le même phénomène convectif est observé en montagne. Les flans de vallées sont chauffés durant la journée et l'air chaud va d'aval en amont car les sommets sont plus chauds. Durant le soir, le courant s'inverse car les sommets dégagent la chaleur accumulée pendant la journée plus rapidement que les fonds de vallées (figure 8).

Cependant, on doit noter que la direction du vent peut être modifiée en intensité et/ou en direction par les vents dominants susceptibles d'exister. Dans ce cas, le vent dominant se mélange avec les courants convectifs pour donner le vent réel.

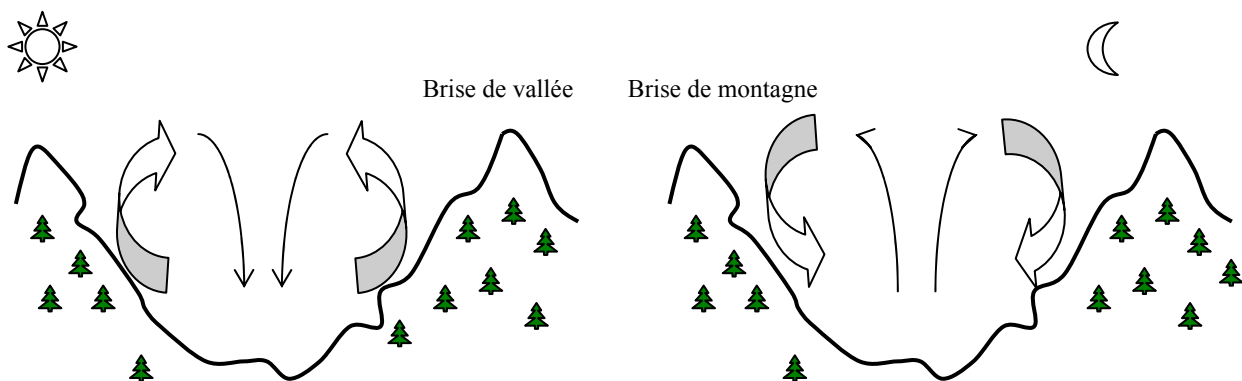


Fig 8. Brise de pente.

5.2. Variations instantanées

Elles sont assez difficiles à caractériser, si les régimes du vent sont répétitifs avec une bonne approximation sur l'année, des enregistrements météorologiques sur 20 ans sont nécessaires pour avoir une idée vague des variations instantanées.

Un vent à rafales impose des contraintes importantes de durée très brèves, il entraîne aussi des fluctuations considérables d'énergie cinétique qui est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

5.3. Variation en fonction de l'altitude

La vitesse moyenne annuelle du vent tout comme la vitesse instantanée varient en fonction de l'altitude, ainsi, de 2 m/s à 20 m du sol, la vitesse peut atteindre 7 à 8 m/s à 300 m d'altitude.

Au voisinage du sol, en raison des frottements et des échanges informationnels, il se crée des ralentissements des filets et courants d'air, qui poussent à la formation des tourbillons induisant une diminution de l'énergie susceptible à être extraite du vent.

En terrain plat, on peut représenter la variation de la vitesse en fonction de la hauteur h du sol par la loi :

$$\frac{V_0}{V_r} = \left(\frac{h}{h_r} \right)^\varepsilon \quad \text{(II.1)}$$

Avec : V_r vitesse à la hauteur h_r de référence au dessus du sol.

V_0 la vitesse du vent observée à la hauteur h .

ε coefficient caractéristique du lieu.

Le coefficient ε a sensiblement les valeurs suivantes :

- En mer : $\varepsilon = 0,13$;
- Sur un rivage : $\varepsilon = 0,16$;
- En plaine : $\varepsilon = 0,2$;
- En plaine boisée : $\varepsilon = 0,24$;
- En ville $\varepsilon = 0,3$.

Généralement, la valeur de h_r est de 10 m.

L'énergie susceptible d'être extraite du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse, il en résulte que le rapport des énergies disponibles à h mètres et à h_0 au dessus du sol est :

$$\frac{E_0}{E_r} = \left(\frac{h}{h_r} \right)^{3\varepsilon} \quad (\text{II.2})$$

Donc pour recueillir le maximum d'énergie, on aura intérêt à placer le moteur éolien le plus haut possible, au sommet d'une tour par exemple, loin des turbulences et des tourbillons.

5.4. Influence du relief

L'intensité du vent est influencée par le relief. En générale, la vitesse du vent est plus importantes sur les collines que dans le fond des vallées.

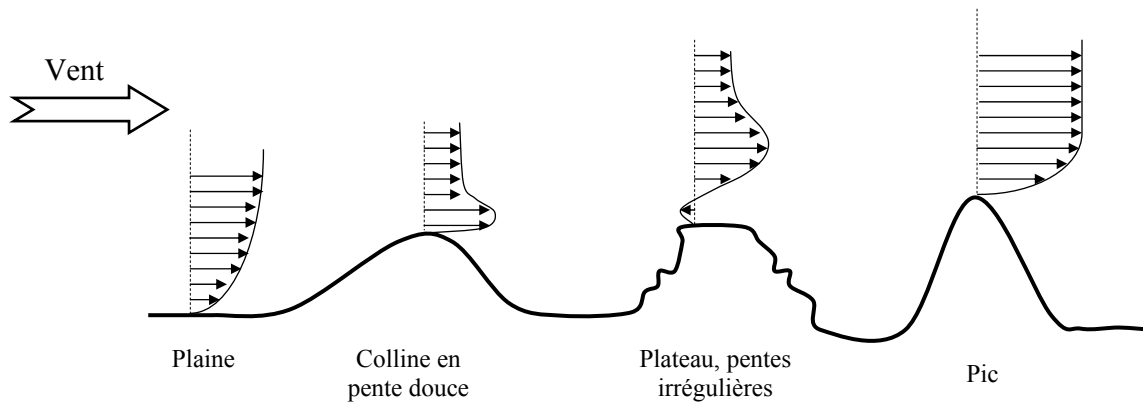


Fig 9. Répartition de la vitesse du vent en fonction du relief.

Les collines de pente douce et progressive situées près des côtes constituent des sites favorables pour l'implantation d'éoliennes, la pente agit comme un convergent et conduit à la concentration des filets d'air en mouvement, ce qui induit à une augmentation de l'énergie cinétique de l'air au niveau du sommet. Par contre, les collines de forte pente sont moins favorables car elles sont le siège de perturbations importantes.

Le large des mers constitue également un site bien balayé, avec un minimum de perturbation, ce sont des zones intéressantes pour l'implantation d'un parc éolien offshore.

Le vent peut être affecté par les arbres, les immeubles ou par les éoliennes avoisinantes, donc lors de l'installation d'un site éolien, on doit impérativement respecter une distance de sécurité entre les aéromoteurs pour éviter que les perturbations créées dans le sillage du rotor ne perturbe le bon fonctionnement de l'éolienne voisine, la distance entre un obstacle quelconque et une éolienne

doit être supérieure à 10 fois la hauteur de l'obstacle [15], cette distance dépend de la vitesse du vent et de la forme aérodynamique de l'obstacle (voir la figure 10).

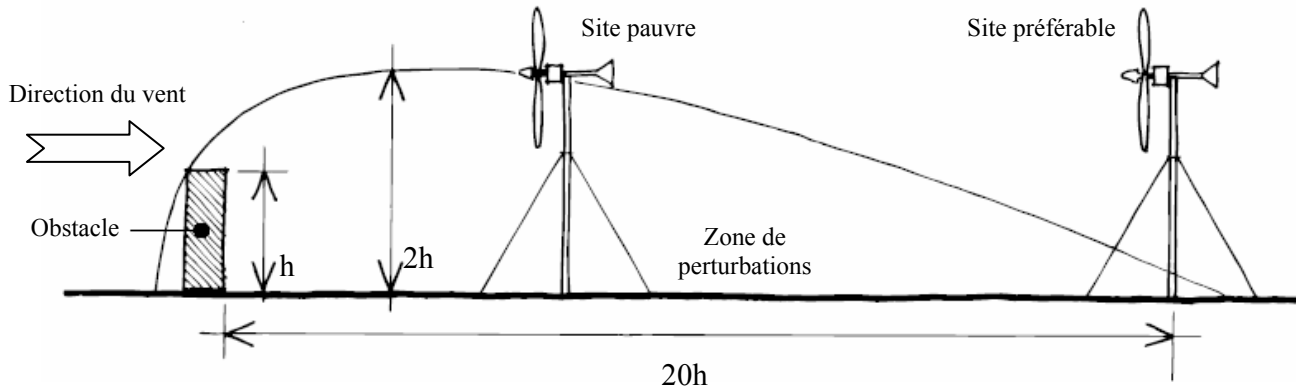


Fig 10. Distance à respecter entre éolienne et obstacle.

6. Energie du vent

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique dans une veine d'air, elle est fonction de la masse et du volume d'air, si on considère que la masse volumique de l'air est constante, l'énergie fournie est fonction de sa vitesse.

L'énergie cinétique de la masse d'air en mouvement est égale à :

$$E_c = \frac{1}{2} \dot{m} V_0^2 \quad (\text{II.3})$$

m étant la masse d'air débitée à la vitesse V durant le temps t , à travers une surface S ; on peut de la sorte écrire :

$$E_c = \frac{1}{2} (\rho S V_0 t) \cdot V_0^2 \quad (\text{II.4})$$

Ce qui implique :

$$E_c = \frac{1}{2} (\rho S t) \cdot V_0^3 \quad (\text{II.5})$$

On en déduit la valeur de la puissance P délivrée par le vent qui est le rapport de l'énergie cinétique par le temps :

$$P = \frac{E_c}{t} \rightarrow P = \frac{1}{2} \rho S V_0^3 \quad (\text{II.6})$$

La masse volumique est faible, la puissance éolienne est une puissance diluée puisque la vitesse de celle-ci ne dépasse pas quelques mètres par seconde. Dans les régions à vents très faibles, l'énergie théorique ne peut être que de 200 kWh/m² et par an.

Dans certaines régions exposées, elle atteint 4000 kWh/m² par an à 40 m au dessus du sol.

6.1. Energie récupérable par le rotor éolien

Pour vaincre leur propre inertie, les aéromoteurs ne démarrent pas au dessous d'une certaine valeur de la vitesse de vent. Pour certains types cette vitesse peut être de 1 m/s tel que les rotors de Savonius, pour d'autres, elle est plus importante, de l'ordre de 3 m/s, spécialement pour les éoliennes rapides conçus pour tourner à grandes vitesses. Il en résulte que les vitesses inférieures à un minimum V_m ne sont pas exploitées.

Il en est de même pour les vents de forte intensité qui sont dangereux pour l'installation. L'éolienne est mise à l'arrêt pendant ces vents de vitesses V_M trop importantes.

En outre, les dispositifs de régulation qui entrent en service lorsque la vitesse de vent dépasse la vitesse nominale V_N et permettent de stabiliser la vitesse de rotation du rotor lorsque celle du vent dépasse V_N sans que cela ne mette en péril l'installation. Dans ce cas, la puissance fournie par l'aéromoteur reste constante et égale à la puissance nominale.

En définitive, seul une partie de l'énergie du vent est transformable par l'éolienne, elle correspond à la zone hachurée (figure 11).

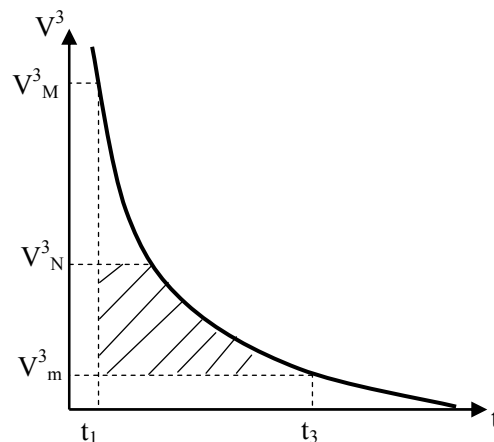


Fig 11. Energie récupérable par l'aéromoteur.

Pour obtenir l'énergie récupérable, il suffit de multiplier la valeur de cette aire exprimée en kW/h par un coefficient tenant compte du rendement de la machine [13].

7. Choix du site

Avant d'entreprendre un projet d'implantation de ferme éolienne, une étude préalable du site est indispensable car la rentabilité, la durée de vie et la fiabilité de la machine dépend beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son fonctionnement.

La prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger la possibilité d'utiliser le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, ses différentes directions mais aussi la quantité d'énergie annuelle récupérable.

Lorsque la certitude de validité de la solution éolienne est acquise, une première sélection sera effectuée pour éviter l'exposition aux écrans éventuels (arbres, falaises, bâtiments, etc.). On se placera toujours en amont des obstacles quand ceci est possible, sinon à une distance qui dépendra de la forme et de la taille de l'obstacle :

- Tour ou pylône cylindrique : 10 fois le diamètre ;
- Mur ou maison : 10 fois la hauteur ;
- Arbre : 6 fois la hauteur.

Cas de deux éolienne l'une dans le sillage de l'autre :

- Minimum : 6 fois le diamètre du rotor ;
- Maximum : 12 fois le diamètre du rotor.

Une colline à pente douce bien dégagée, un rétrécissement de vallée ou bien le bord de mer constituent des sites intéressants pour une installation éolienne, mais les pentes supérieures à 45° ou les falaises sont à l'origine de perturbations dans l'écoulement des filets d'air qui conduisent à des vibrations destructrices à moyen terme.

La nature du sol est aussi importante pour l'ancrage du pylône support d'aérogénérateur, un sol rocheux sera plus favorable à l'implantation d'un pylône support haubané qui est de coût relativement réduit par rapport au support autoporteur pour une hauteur égale.

Le moyen d'accès au site pour les véhicules utilitaires destinés au transport des différents éléments et des matériaux de construction, les grues pour le montage de l'éolienne, peut être un réel problème donc à ne pas négliger.

Il faut aussi prendre en compte la proximité de l'utilisation ou de stockage, et la façon de se raccorder au réseau électrique, car plus les liaisons sont courtes, moins elles nécessiteront des sections de câbles importantes pour assurer les pertes minimales. La chute de tension ΔU peut se calculer comme suit :

$$\Delta U = n(R.I) \quad \text{avec} \quad R = \rho \frac{l}{s} \quad (\text{II.7})$$

l : la longueur du câble entre l'aérogénérateur et l'utilisateur ;

s : la section du câble en m^2 ;

ρ : résistivité du matériaux utilisé (cuivre : $1,8 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, aluminium : $2,7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$);

I : intensité nominale du courant ;

n : le nombre de conducteurs selon qu'on est en mono ou en triphasé.

Chapitre III

Généralités sur les aéromoteurs

1. Historique

On estime que chaque année, le vent distribue entre 2.5 et 5.10^{15} kWh, une énergie très importante mais difficilement récupérable car c'est une énergie très diluée. C'est ce potentiel énorme que représente l'énergie éolienne qui a poussé les hommes à trouver un moyen toujours plus perfectionné pour sa transformation en énergie mécanique ou électrique.

L'homme sut assez tôt se servir de l'énergie du vent pour ces besoins vitaux, de nombreux millénaires avant J.-C. il y avait déjà des bateaux à voile sur le Nil. C'est sans doute de là que vient l'idée de faire tourner indéfiniment la voile autour de son axe.

Ainsi, dès le V^e siècle avant notre ère, on voyait déjà des éoliennes à axe vertical également appelées panémons dans les îles grecques. Le premier moulin à vent a été fabriqué en Perse en 134 avant J.-C. et fonctionnait grâce à un mur protégeant les pales du vent au cours de leur retour. Puis on a beaucoup utilisé l'énergie éolienne pour le pompage et l'irrigation des cultures. L'éolienne a poursuivi sa lente évolution au cours des siècles, et les rotors à axe horizontal n'ont fait leur apparition qu'au XIII^e siècle. Là, les constructeurs et les utilisateurs se préoccupent plus des effets aérodynamiques liés à la forme des pales et à leur nombre pour ne citer que ces deux facteurs. Les premiers aérogénérateurs ont vu le jour en 1850, mais l'idée de l'aérogénérateur date de 1802 où Lord Kelvin, un physicien anglais, associa une génératrice d'électricité à un moteur éolien. Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. Parallèlement, les recherches dans le domaine de l'aérodynamique faites par l'aéronautique ont permis une évolution des moteurs éoliens.

Entre le début du XX^e siècle jusqu'à l'année 60, on a assisté à ce qu'on appelle « la tendance au gigantisme » [14], des éoliennes de taille considérable ont été mises en œuvre pour la production de l'électricité mais elles ont eu que peu de succès, de par l'énorme longueur des pales, elles devenaient fragiles aux turbulences qui se créent dans le vent, tel la centrale de Balaklava URSS 1932 installée sur un site à vent moyen annuel de 6,75 m/s, elle fournissait 279 000 kW/h par année pour un diamètre de rotor de 30 m, c'est le premier monstre éolien, elle a été jugée lourde pour son débit, de faibles rendements et d'épaisse technologie, après 4 années de service, elle a été mise à l'arrêt. Aussi la machine construite à Grand Pa's Knob, dans le

Vermont (USA) de 60 m de diamètre, elle devait fournir plus de 1 250 kW de puissance. Au début toute allait bien, mais après 18 mois de fonctionnement, un roulement lâche et les pales fatiguent. Après ces expériences enrichissantes, on opta plus pour des parcs d'éoliennes de dimensions moyennes, plus rentables, faciles à installer et d'un rendement plus important.

Cependant, dans les années soixante, le faible coût des autres sources d'énergie (notamment le pétrole) a dissuadé l'expansion de l'exploitation de l'énergie éolienne. En effet, pour que cette source d'énergie écologique parce que non-polluante, attractive car autonome puisse être commercialisée, il est nécessaire qu'elle soit rentable par rapport aux autres sources d'énergie.

Dans quels cas alors est-il préférable d'opter pour l'énergie éolienne? Principalement lorsqu'on se situe dans une région éloignée, à l'écart du réseau électrique national, ou bien encore lorsque l'on n'a besoin que d'une faible quantité d'énergie et d'une puissance fournie non régulière pour alimenter une pompe à eau par exemple (Le problème de l'irrégularité de la puissance fournie par l'aérogénérateur peut être remédié par la présence d'une batterie de stockage tel que les accumulateurs à plomb et/ou d'une source d'énergie secondaire qui se met en marche lorsque la batterie est vide).

Tout ceci était encore vrai au début des années "80" mais les progrès technologiques ont fait que depuis le début des années "90", les perspectives d'exploitation de l'énergie éolienne sont complètement différentes. En effet, même si le coût actuel de l'électricité éolienne dépasse encore d'au moins 20% celui de l'énergie conventionnelle, en comptant avec une érosion continue du prix des machines (moins 20% durant trois années (1995-1998)), et de celui de l'installation, la puissance et l'efficacité sans cesse croissante des machines éolienne, on peut envisager un coût du kilowattheure compétitif dans peu de temps [16]. Pour donner une idée des énormes progrès réalisés, pour des vents moyens de 23 km/h, le prix du kWh a chuté de 50 à 29 centimes, au Danemark depuis 1990 et la puissance moyenne des machines est passée de 30 kW en 1983 à 600 kW en 1997. Tous ces bouleversements techniques font que ce secteur est actuellement en pleine expansion et que s'ouvre à lui une multitude de marchés mondiaux [17]. En effet, en cinq ans, le marché annuel mondial a plus que quadruplé pour atteindre 1566 mégawatts en 1997 (l'Europe représente 84% du marché), et BTM Consult, société d'études spécialiste du secteur, déclara une croissance de la demande mondiale de 18 % par an jusqu'en 2002.

2. Classification des éoliennes

Les éoliennes sont généralement classées par rapport à l'organe capteur, qui est la partie la plus importante de l'aéromoteur car c'est lui qui capte l'énergie de l'air en mouvement et la transforme en énergie mécanique. Le rendement de l'éolienne dépend en grande partie de la manière dont le capteur est dimensionné.

2.1. Caractéristiques du capteur

Il existe 3 principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien:

2.1.1. Paramètre de vitesse

Le paramètre de vitesse λ est le rapport de la vitesse maximale de déplacement de l'aubage u à la vitesse du vent incident V_0 , avec $U = \Omega R$.

$$\lambda = \frac{U}{V_0} \quad (\text{III.1})$$

Les machines peuvent être classées en fonction de ces paramètres :

$\lambda \leq 3 \rightarrow$ L'éolienne est lente ;

$\lambda > 3 \rightarrow$ L'éolienne est dite rapide.

De fortes valeurs de λ permettent un meilleur rendement et de meilleures possibilités d'utilisation.

Les éoliennes rapides peuvent avoir un λ égal à 20. Cependant une grande vitesse de rotation peut entraîner des nuisances telles que le bruit.

2.1.2. Coefficient de puissance

Il est noté C_p est défini par le rapport de la puissance P_{\max} recueillie sur l'arbre moteur à la puissance cinétique disponible dans le vent.

$$C_p = P_{\max} / (0,5\rho S V^3) \quad (\text{III.2})$$

La valeur de C_p maximale est définie par Betz en 1927 et qui est égale à 0,592.

2.1.3. Coefficient de couple

C'est le rapport du couple moteur C_{\max} qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien

($C_{\max} = P_{\max} / \omega$) au couple aérodynamique C_a ($C_a = \frac{1}{2} \rho S V^2 R$), il est noté C_c :

$$C_c = C_{\max} / C_a \quad (\text{III.3})$$

Les paramètres C_p et C_c caractérisent les performances du capteur et sont habituellement représentés en fonction de λ .

$$C_p = \lambda C_c \quad (\text{III.4})$$

Généralement, les capteurs éoliens sont classés selon leur axe de rotation qu'il soit horizontal ou vertical :

2.2. Aéromoteurs à axe horizontal

Ce sont actuellement les machines 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, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau.

On distingue trois types :

2.2.1. Les moulins à vent

Ils sont aussi appelés les moulins hollandais car c'est là qu'ils sont le plus répandus, on les rencontre principalement en Europe le long des côtes de l'Atlantique, de la Mer du Nord et de la Baltique mais aussi de la méditerranée. Beaucoup ont disparu mais plusieurs subsistent encore admirés par les touristes et les visiteurs.

Les moulins à vent peuvent être classés en deux types : les moulins à cage tournante et les moulins à toit tournant.

2.2.1.1. Les moulins à toit tournant

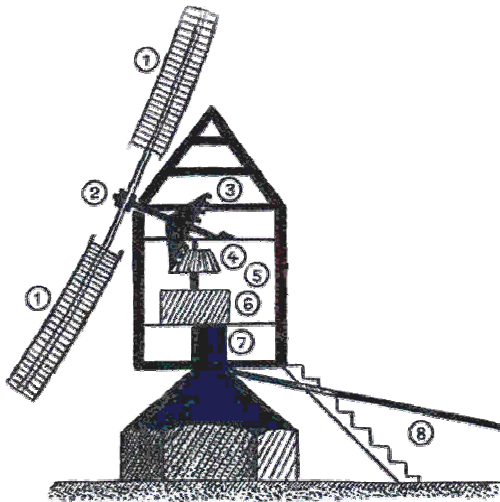
La toiture qui porte l'arbre de rotation du moulin, peut tourner au dessus du bâtiment généralement en maçonnerie et de forme tronconique.

Le toit est prolongé vers le bas par une longue poutre dont la manœuvre permet d'orienter les ailes du moulin face au vent. Les plus modernes sont orientés par une roue éolienne auxiliaire.

2.2.1.2. Les moulins à cage tournante

L'axe de rotation de la roue est solidaire de la cage. L'ensemble du moulin est placé sur pivot comme dans le type précédent. L'orientation de la roue face au vent est assurée par un bras d'orientation ou par des éoliennes auxiliaires.

Le plus souvent, les ailes sont en bois recouvertes de toiles, on pouvait donc régler la vitesse de rotation en ouvrant ou fermant les volets mobiles garnissant les voiles.



1. Ailes ou volants
2. Axe des ailes
3. Roue motrice
4. Roue à pignon
5. Axe de la meule
6. meule
7. Pivot
8. gouvernail ou queue

Fig 12. Coupe d'un moulin à vent sur pivot

2.2.2. Les éoliennes lentes

Elles ont fait leur apparition à partir de 1870 en Amérique puis en Europe, les éoliennes multipales peuvent comporter de 12 à 30 pales et couvrent pratiquement la totalité de la surface de la roue ou presque.

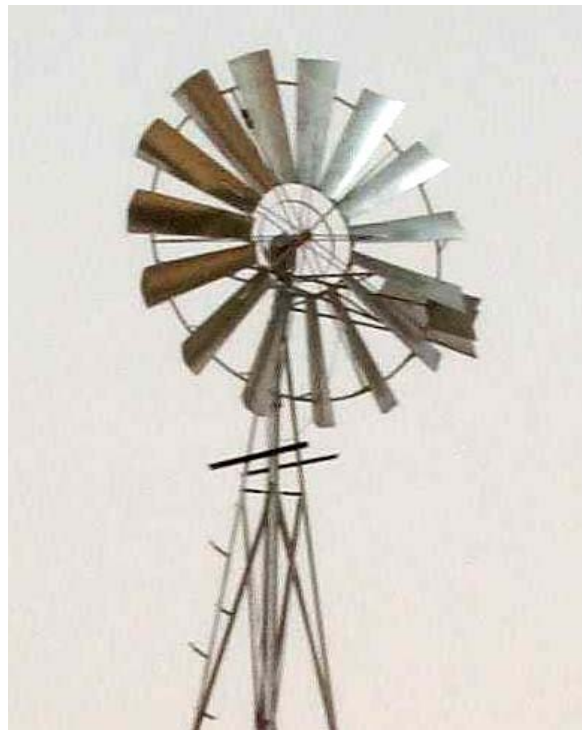


Fig 13. Eolienne américaine

Le plus souvent, ces éoliennes sont de petite taille, la roue à couramment le diamètre de 3 à 8 mètres. Ces éoliennes démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et fonctionnent bien jusqu'à des vitesses de vent de 7 à 8 m/s, au-delà, il faut prévoir un dispositif d'arrêt et d'éclipsage qui doit mettre la machine en sécurité. Ces éoliennes sont pourvues d'un gouvernail de direction pour orienter le disque normalement à la direction du vent.

Les puissances développées par ce type d'éolienne sont relativement modiques car non seulement elles utilisent des vents de vitesses comprises entre 3 et 7 m/s, mais aussi, le poids est tel qu'on ne dépasse guère en construction des diamètres de 7 à 8 m.

Par ailleurs, leur couple de démarrage qui est assez important les rend très utiles dans les régions où l'intensité du vent est assez faible, de l'ordre de 4 à 5 m/s, particulièrement pour le pompage de l'eau dans les sites isolés tel que le désert.

2.2.3. Les éoliennes rapides

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



Fig 14. Hélice au vent



Fig 15. Hélice sous le vent

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* ». Ces dernières se mettent automatiquement face au vent ce qui permet d'éviter le système d'orientation coûteux et encombrant mais la position du rotor qui est après le pylône fait accroître les turbulences existant dans l'air en diminuant donc la puissance à extraire du vent. (Voir les Figures 14 et 15).

Les éoliennes rapides présentent la particularité d'avoir une puissance nominale très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts, de même la taille du rotor est de 1 à 100 mètres de diamètre. Elles sont relativement légères et tourne à vitesse très rapide ce qui les rend adaptés pour la production d'électricité.

Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement, sauf dispositifs spéciaux, il faut un vent de 5 m/s au moins pour qu'elles se mettent en production [13].

2.3. Aéromoteur à axe vertical

Ce sont vraisemblablement les machines qui ont été utilisées les premières pour capter l'énergie du vent car elles sont de conception beaucoup plus simple que les machines à axe horizontal, en particulier, elles ne nécessitent pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, ce qui constitue un avantage de construction non négligeable, et en fonctionnement, elles ne sont pas soumises aux contraintes importantes sur les pales, les roulements et les axes dues aux changements d'orientation, comme dans les machines à axe horizontal.

Malheureusement, elles ont un rendement médiocre (20% sur la limite de Betz pour le rotor de Savonius) et c'est pour cette raison qu'elles n'ont pas connu un grand développement.

Les principaux capteurs éoliens à axe vertical sont :

- Les machines à traînée différentielle ;
- Les machines à écran ;
- Les machines à clapets battants ;
- Les machines à variation cyclique d'incidence.

Dans ce qui suit, on se contentera de présenter les machines les plus répandues.

2.3.1. Machines à traînée différentielle

Le mouvement de rotation des machines de ce type est dû au fait que l'air en mouvement exerce sur les corps creux ou dissymétriques des forces d'intensité très différentes selon l'orientation des corps par rapport à la direction du vent.

Ainsi, si le vent souffle sur la partie creuse ou concave d'une demi-sphère, le coefficient aérodynamique C qui intervient dans l'expression de la force agissante :

$$F = \frac{1}{2} \rho S V^2 C \quad (\text{III.5})$$

est égal à 1,33 alors qu'il n'est que de 0,34 lorsque le courant d'air s'exerce sur la partie convexe de la sphère.

2.3.1.1. Anémomètre à coupelles (moulinet)

Le modèle le plus simple des aéromoteurs à traînée différentielle est bien l'anémomètre à coupelles (figure 16). Il est généralement utilisé pour mesurer la vitesse du vent.

Cet anémomètre à coupelles peut être :

- A main à lecture directe, on aura soin de faire les mesures toujours dans les mêmes conditions sur un site suffisamment dégagé ;
- Fixe à lecture déportée, on placera l'appareil si possible à la hauteur prévue de l'aérogénérateur ;
- Relié à un enregistreur graphique dont on dépouillera les bandes.

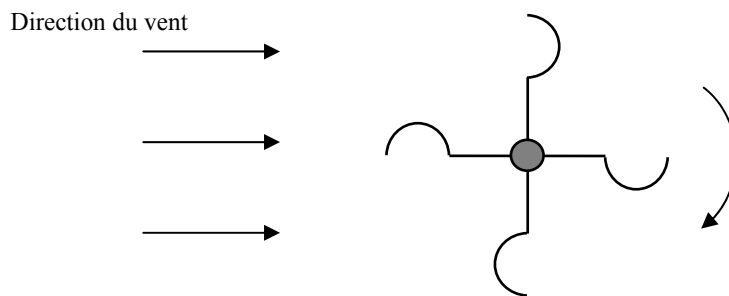


Fig 16. Anémomètre à coupelles

2.3.1.2. Le rotor Savonius

Cette machine a été inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924. Elle a fait l'objet d'un brevet déposé en 1929.

Elle comporte essentiellement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Le modèle original était construit (figure 18) avec un rapport $e/d = 1/3$, e , désignant l'écartement des bords intérieurs, d , le diamètre des deux demi-cylindres constituant le rotor.

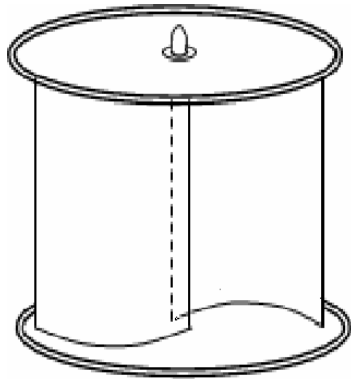


Fig 17. Eolienne Savonius

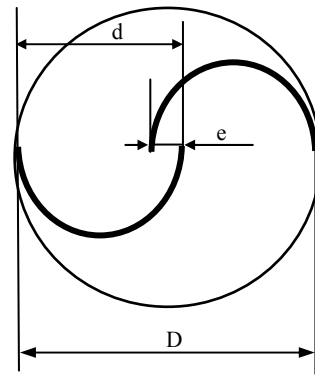


Fig 18. Coupe de dessus de l'éolienne Savonius

Outre le fait que les forces exercées par le vent sur les aubages diffèrent suivant qu'il s'agisse de la partie convexe ou de la partie concave, le rotor Savonius est soumis à un couple aérodynamique supplémentaire dû aux deux déviations successives à 180° des filets de vent par les aubages. Certains rotors possèdent 3 ou 4 pales ce qui évite les irrégularités dans le couple.

2.3.2. Machines à écran

Pour éliminer la poussée du vent sur les aubages qui vont à contre courant, des chercheurs ont eu l'idée de placer devant ceux-ci un écran orientable, ainsi les aubes peuvent être réduites à de simples plaques planes ou légèrement cambrées (voir figure 19).

Le positionnement de l'éolienne face au vent est assurée par un gouvernail placé à l'aval du rotor lié à l'écran lequel peut tourner librement autour de l'axe de la machine. Ce type d'éolienne permet une bonne prise au vent mais le double dispositif le rend assez lourd.

Les machines Persan s'apparente aux machines à écran mais celui-ci n'est pas orientable.

2.3.3. Machine à clapets battants

Elle permet une bonne utilisation du vent, mais elle est fragilisée et d'un fonctionnement bruyant causé par le choc des aubes sur les butées à chaque tour (voir figure 20).

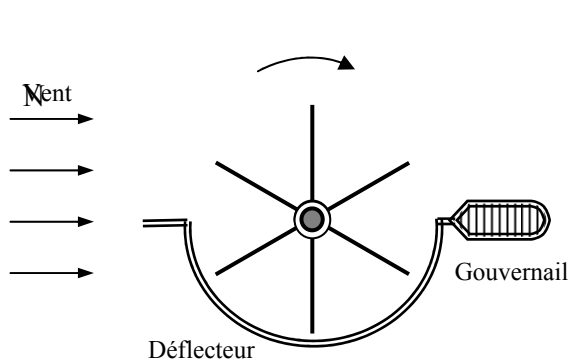


Fig 19. Machine à écran

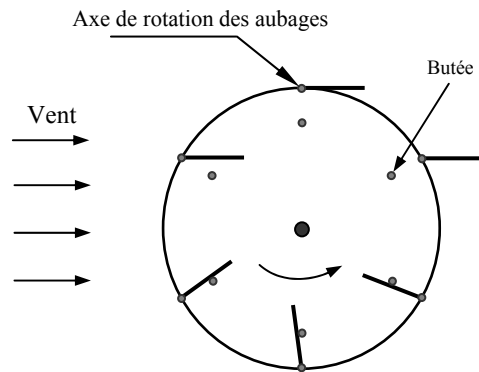


Fig 20. Machine à clapets battants

2.3.4. Machines à variation cyclique d'incidence

Il s'agit d'un capteur à circulation instationnaire. Conçu par l'ingénieur français George Darrieus, il a fait l'objet d'un brevet en 1925 [18].

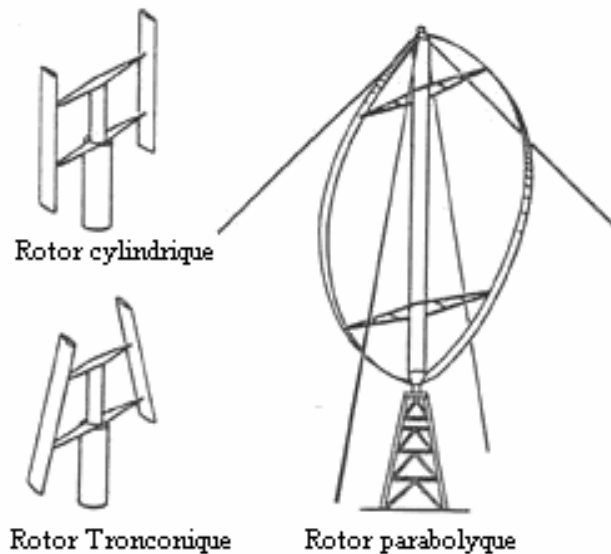


Fig 21. Le rotor Darrieus

Les rotors Darrieus utilisent la portance des pales, ils sont caractérisés par un faible couple de démarrage mais une vitesse de rotation élevée, donc une grande puissance récupérable. Ils sont constitués par des aubages à profil biconvexe qui tournent autour d'un axe vertical, ils peuvent avoir différentes configurations (cylindrique, tronconique, ou parabolique) (Figure 21) et comporter 2, 3 ou plusieurs pales.

Pour améliorer leur couple de démarrage, on peut leur associer à un autre type de rotor (par exemple, le rotor de Savonius). Cela affecte bien sûr les autres propriétés (légereté, vitesse et coût), une optimisation et donc nécessaire.

Ce type de machines susceptibles de concurrencer les aéromoteurs rapides bi ou tripales à axe horizontal fait l'objet d'étude très poussées (National Research Council of Canada, Albuquerque et Nouveau-Mexique Etats-Unis et même au Danemark).

3. Théorie de Betz

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'énergie maximale théorique qu'un rotor peut extraire du vent est :

$$E_c = \frac{1}{2}(\rho St).V_0^3 \quad (\text{III.6})$$

Et la puissance maximale susceptible d'être prélevée au vent est :

$$P = \frac{1}{2}\rho S V_0^3 \quad (\text{III.7})$$

La théorie générale du moteur éolien à axe horizontal indique que l'énergie cinétique du vent n'est pas entièrement récupérée car il faut nécessairement évacuer l'air qui a travaillé dans le capteur, autrement dit, par suite de l'action de la retenue de la vaine d'air par la roue, la vitesse axiale amont V_1 diminue en aval jusqu'à la vitesse V_2 (figure 22).

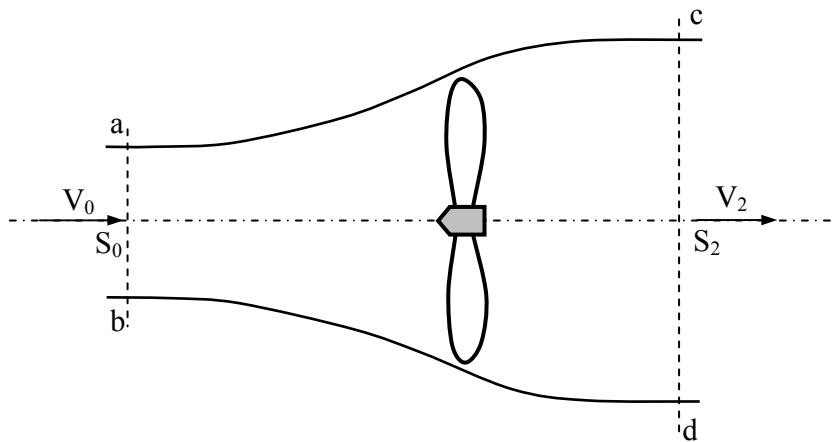


Fig 22. Volume de contrôle autour du rotor

D'après le théorème de la variation de la quantité de mouvement, l'effort qui s'exerce sur le rotor est donné par :

$$F = \rho Q(V_0 - V_2) \quad (\text{III.8})$$

$$Q = S_0 V_0 = SV = S_2 V_2 \quad (\text{III.9})$$

La force devient :

$$F = \rho SV(V_0 - V_2) \quad (\text{III.10})$$

Cette effort dont le point d'application se déplace à la vitesse V crée une puissance s'exprimant par :

$$P = F.V = \rho SV^2(V_0 - V_2) \quad (\text{III.11})$$

La puissance qu'un moteur éolien peut absorber est égale à la variation de l'énergie cinétique ΔE_c de la masse d'air qui le traverse par seconde. Il vient que :

$$P = \Delta E_c = \frac{1}{2} \rho SV(V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{III.12})$$

En égalisant les équations (III.11) et (III.12), on en tire :

$$V = \frac{V_0 + V_2}{2} \quad (\text{III.13})$$

Si on pose $a = \frac{V_0}{V_2}$ on peut écrire :

$$P = \frac{1}{4} \rho SV_0^3 (1+a)^2 (1-a) \quad (\text{III.14})$$

Etudions la variation de la puissance recueillie en fonction de a :

$$\frac{dP}{da} = 0 \Rightarrow 2(1+a)(1-a) - (1+a)^2 = 0$$

$$\text{Soit } a = \frac{1}{3} \quad (\text{III.15})$$

Ce qui veut dire que $V_2 = \frac{V_0}{3}$ ce qui correspond à un maximum de puissance.

En reportant cette valeur de V_2 dans l'expression de la puissance, on obtient :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho SV_0^3 \quad (\text{III.16})$$

Ce qui est le maximum de la puissance susceptible d'être recueillie par un moteur éolien à axe horizontal, cette valeur constitue la limite de Betz, elle est égale au 16/27 de l'énergie cinétique présente dans une veine d'air en mouvement.

$$C_p = \frac{P_{\max}}{P_{\text{disp}}} = \frac{\frac{8}{27} \rho S V_1^3}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} = \frac{16}{27} \quad (\text{III.17})$$

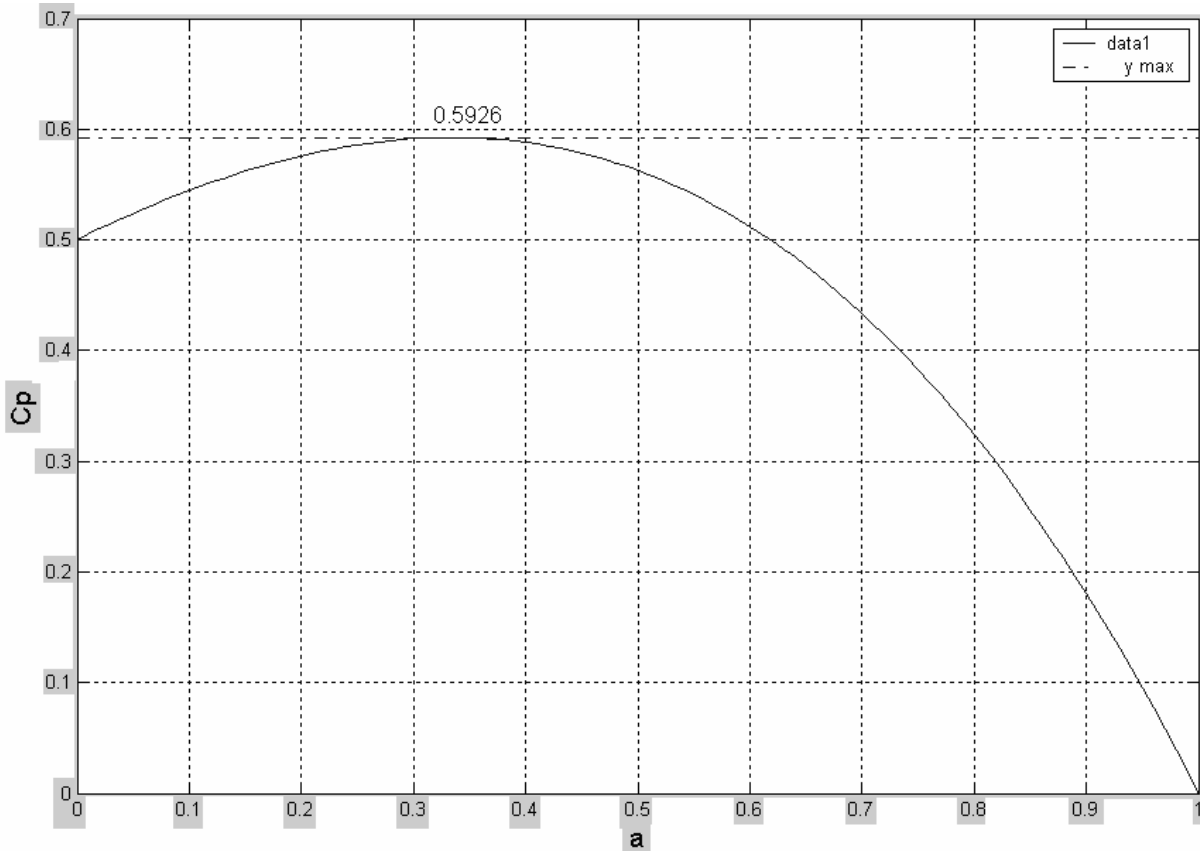


Fig 23. Rendement de la puissance prélevée en fonction de a.

Le rendement de Betz démontre qu'il n'est possible de récupérer, au mieux, que moins de 60 % de l'énergie du vent, par rapport auquel on établit le rendement du capteur.

La force exercée sur le rotor est due à la différence de pression entre l'amont et l'aval de celui-ci, à l'amont, la pression est plus importante qu'à l'aval, en remplaçant l'équation (III.13) dans (III.10), on aboutit à l'expression de Δp qui est :

$$\Delta p = \rho \frac{V_0^2 - V_2^2}{2} \quad (\text{III.18})$$

Remarque : Bien que la théorie de Betz a été établie pour une éolienne à axe horizontal, il est admis que cette valeur limite s'applique à la plupart des machines.

4. Caractéristiques technologiques des éoliennes

4.1. L'hélice

Elle est l'organe le plus important de l'aéromoteur, nécessitant un dimensionnement minutieux, c'est l'organe qui détermine l'efficacité de la machine, elle est composée d'une, deux ou plusieurs pales (jusqu'à 24 pour les éoliennes américaine), droites ou vrillées, de profils différents selon les catégories de machines.

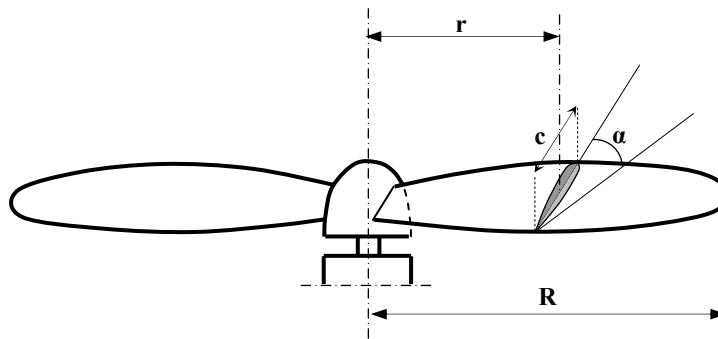


Fig 24. Représentation d'un rotor éolien bipale

L'hélice est caractérisé par :

- Axe de l'hélice : l'axe de rotation de l'hélice ;
- Diamètre de l'hélice : le diamètre du cercle balayé par le bout des pales ;
- Axe d'une pale : c'est l'axe longitudinal autour duquel on peut faire varier l'inclinaison de la pale par rapport au plan de rotation de l'hélice ;
- Profil de la pale : l'intersection de la pale avec un cylindre ayant pour axe, l'axe de l'hélice (le profil de la pale varie en fonction de la distance r qui sépare le profil de l'axe de rotation) ;
- L'angle de calage d'un profil: c'est l'angle α que fait la corde du profil avec le plan de rotation du rotor ;
- Pas d'une hélice : le pas d'une section ou d'un profil situé à la distance r de l'axe est égal à la distance H dont avancerait pour une rotation de 1 tour une hélice à pas constant se

vissant exactement dans l'air, cette hélice admettant pour section à la distance r la section considérée.

Le pas H d'une section est lié à l'angle de calage α par l'expression :

$$H = 2\pi r \operatorname{tg} \alpha \quad (\text{III.19})$$

On définit aussi la circulation Γ d'un profil C par :

$$\Gamma = \int_C v \, ds \quad (\text{III.20})$$

Si cette circulation varie périodiquement, l'écoulement est instationnaire, si elle est constante, l'écoulement est alors stationnaire.

Le coefficient d'utilisation d'aubage $\sigma = \frac{S_c}{S_v}$ est le rapport de l'aire développée par l'ensemble des aubages à l'aire de la veine d'air interceptée.

$S_c = BcR$, B étant le nombre de pales et $S_v = \pi R^2$

$$\sigma = \frac{Bc}{\pi R} \quad (\text{III.21})$$

4.2. La pale

La pale est caractérisée par sa longueur, largeur, profil et les matériaux de construction.

4.2.1. La longueur de la pale

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.

4.2.2. Le profil

Il est choisit en fonction du couple désiré, chaque profil fournissant pour l'angle d'incidence optimal un couple fonction de C_z et de C_x (le coefficient de traînée est négligeable par rapport au coefficient de portance pour les incidences optimales).

Lorsque le profil et la fréquence de rotation pour la vitesse de vent nominale sont fixés, on détermine le calage. Pour les aérogénérateurs de petite et moyenne puissance, les pales ne sont

pas vrillées, c'est-à-dire que l'angle d'inclinaison est fixe sur toute la longueur de la pale, mais en ce qui concerne les éoliennes de grande puissance, les pales sont vrillées pour avoir un angle d'incidence optimal sur tout le long de la pale.

Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils sont généralement étudiés pour l'aéronautique (ailes ou hélices). On trouve les répertoires de profils dans les bibliothèques ou les librairies spécialisées, mais ils sont onéreux.

Les profils sont souvent désignés par le nom du laboratoire, associé à un nombre de référence tel que les NACA 4412, NACA 0012, ou les Göttingen 548, ou bien Wortman FX 72-MS 150B...

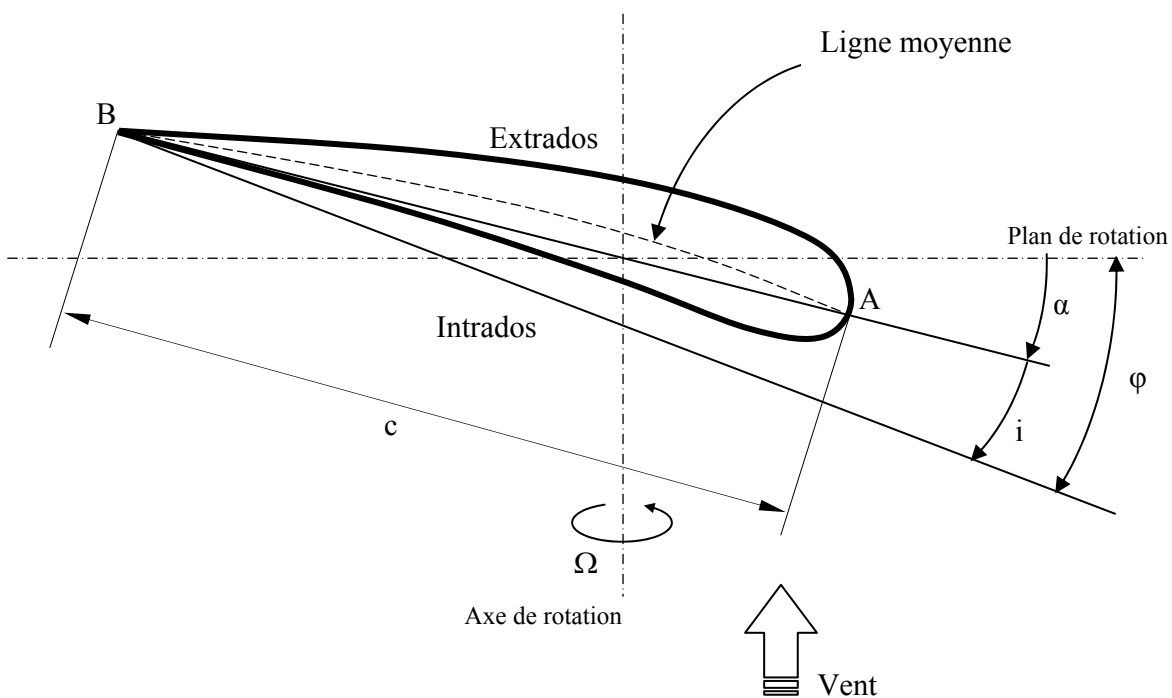


Fig 25. Caractéristique géométrique de la pale

On appelle :

- Bord d'attaque les points les plus éloignés des points B où se trouve le bord de fuite.
- AB est appelée corde de référence du profil.
- Angle d'incidence du profil i : C'est l'angle formé par la corde de ce profil et la direction de la vitesse relative, on l'appelle aussi angle d'attaque.
- L'angle d'inclinaison φ : c'est l'angle que fait la direction de la vitesse relative avec le plan de rotation de l'hélice.

$$\varphi = \alpha + i \quad (\text{III.22})$$

L'action du vent sur la pale (figure 25), engendre une surpression sur l'intrados et une dépression sur l'extrados.

Pour représenter l'action de l'air en chaque point du profil, on porte habituellement sur des droites perpendiculaires au profil, une longueur égale au coefficient de pression locale.

$$K_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (\text{III.23})$$

p désignant la pression statique à la paroi au pied de la perpendiculaire.

p_0 , ρ_0 , V_0 représentent les conditions à l'infini.

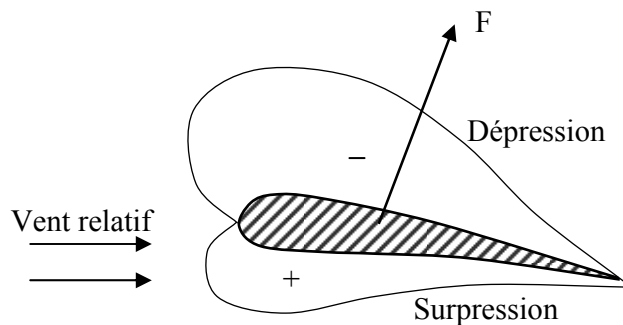


Fig 26. Action de l'air sur l'élément de pale

L'action de l'air sur le corps se traduit par une force résultante F généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative. Cette force s'appelle action aérodynamique totale ou plus simplement résistance de l'air. Cette force F a pour expression :

$$F = \frac{1}{2} C_p S V^2 \quad (\text{III.24})$$

C étant un coefficient sans dimension appelé coefficient aérodynamique total.

S est la surface caractéristique de l'élément produit de la longueur de la corde par la longueur.

4.2.3. La largeur de la pale c

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.

4.2.4. Les matériaux

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficiés de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère.

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 fonctionnement.

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 : Intéressant 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.

4.3. Les supports d'aéromoteurs

Les aéromoteurs de petite et de moyenne puissance peuvent être placés sur deux types de supports :

- Les supports autoporteurs :

- Treillis métallique ;
- Tubulaires en acier ;
- En béton ;
- Les supports haubanés :
 - Treillis métallique ;
 - Tubulaires.

4.3.1. Les supports autoporteurs

- Les pylônes supports en treillis métalliques semblables à ceux utilisés pour le transport de l'énergie électrique sont très robustes mais ils sont coûteux et long à monter. Il faut éviter de les utiliser avec un aérogénérateur dont l'hélice tourne sous le vent du pylône, car leur traînée est très grande. Leur entretien n'est pas aisé et une plateforme de service devra être prévue à cet effet.

- Les supports en béton, d'un coût plus réduit, présentent une traînée plus faible que celle des pylônes en treillis métallique. Ils sont également longs à mettre en œuvre, de plus ils ne sont pas réutilisables si on déplace ou on supprime l'aéromoteur.

- Les pylônes tubulaires autoporteurs seront utilisés lorsque la taille de la machine le permettra (masse < 1000kg) et qu'il sera impossible d'utiliser un support haubané à cause du relief. Ces supports autoporteurs doivent être bien dimensionnés de façon:

- à Résister au moment dû à la traînée en tête du support pour des vents les plus forts ;
- à ce que ses fréquences propres soient bien découplées des fréquences dues à l'aérogénérateur.

4.3.2. Les supports haubanés

Chaque fois que le relief le permet, il est préférable d'utiliser un support haubané basculant qui permet de faire sans danger l'entretien de la machine et du pylône, en plus la construction de celui-ci est simple et moins coûteuse que celle du pylône autoporteur.

Un haubanage à 4 haubans inclinés à 45° dont le point d'ancrage sur le pylône dégagera la hauteur nécessaire à la rotation de l'hélice sera réalisé en câble d'acier galvanisé. La liaison entre les ancrages au sol et le câble se fera par des ridoirs à lanternes pour le réglage de la tension des haubans.

Tab 3. Exemple de dimensionnement de pylônes haubanés tubulaires

Φ hélice (m)	Haut. pylône (m)	Haut. point d'ancrage (m)	Φ tube (mm)	Epais. tube (mm)	Section des haubans (cm ²)
2	15	14.2	139.7	4	11
5	15	13	323.9	7.1	20

Quel que soit le type de support utilisé, il faut tenir compte :

- De la protection contre la corrosion ;
- De la facilité de montage et de démontage de la machine ;
- Des risques de givrage.

4.4. Dispositifs d'orientation

Certaines machines peuvent se passer du système d'orientation tel que la plupart des éoliennes à axe vertical, les éoliennes à axe horizontal dont le rotor est sous le vent se mettent automatiquement dans le lit du vent, ce système à l'avantage d'être simple et assure une bonne stabilité, par contre, les machines à hélice au vent nécessitent obligatoirement une orientation permanente dans une direction parallèle à la direction du vent pour minimiser les contraintes et les pertes de puissance, néanmoins ce type d'éolienne soustrait les pales au sillage du pylône. Les dispositifs les plus utilisés sont :

- L'empennage ;
- L'éolienne auxiliaire ;
- Les dispositifs à servomoteur.

4.4.1. Empennage

Cette solution (figure 27) est utilisée principalement pour l'orientation des éoliennes lentes jusqu'à 6 m de diamètre. Pour que le fonctionnement soit satisfait, certaines conditions doivent être observées :

Si on donne à la direction axe d'orientation – centre de l'empennage, une valeur L égale à $4E$, E désignant la distance axe d'orientation – plan de rotation de l'hélice, la surface s de l'empennage doit avoir en fonction de S , aire balayée par l'hélice, les valeurs suivantes :

Pour une éolienne multipales $s = 0.10 S$;

Pour une éolienne bipales ou tripales $s = 0.04 S$;

Si L est différent de $4E$, les surfaces d'empennage qui assureront la stabilité seront calculées par les relations suivantes :

Pour une multipales : $s = 0.4S \frac{E}{L}$

Pour une éolienne rapide : $s = 0.16S \frac{E}{L}$

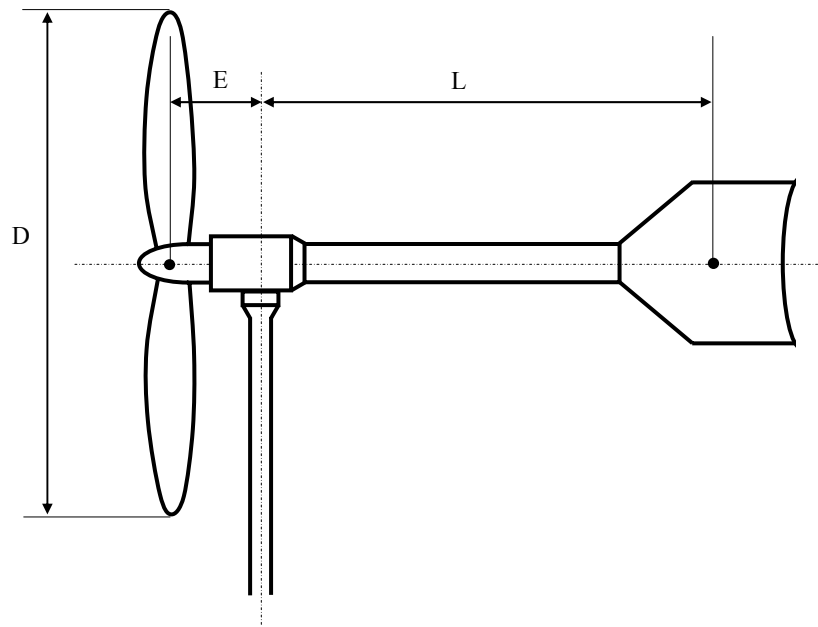


Fig 27. Eolienne avec un système d'empennage

4.4.2. Eolienne auxiliaire

Le principe de fonctionnement de ce type de système est le suivant : on place sur le côté de l'axe de l'éolienne principale une ou deux petites éoliennes (figure 28) dont l'axe ou les axes de rotation sont perpendiculaires à celui de l'éolienne principale.

Si l'éolienne principale n'est pas dans le lit du vent, l'éolienne auxiliaire se met en marche, entraînant une vis sans fin qui engrène sur une couronne dentée, concentrique à l'axe du support et solidaire à celui-ci.

L'éolienne auxiliaire s'arrête lorsqu'elle reçoit le vent perpendiculairement à son axe. A ce moment l'éolienne principale est exactement dans le lit du vent. Ce procédé présente l'avantage d'être plus doux et progressif que le précédent.

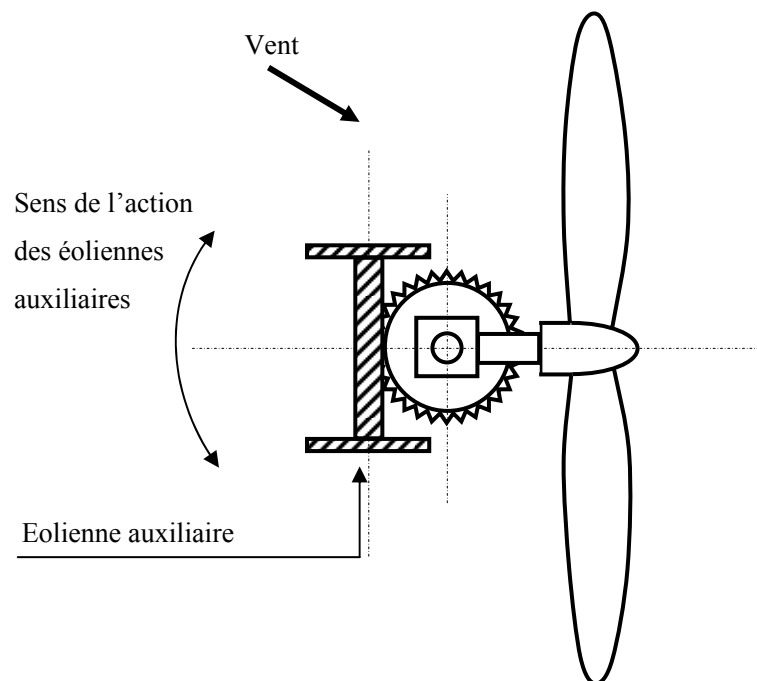


Fig 28. Orientation par éolienne auxiliaire (vue de dessus)

4.4.3. Orientation par servomoteur

Le moteur d'orientation qui peut tourner dans les deux sens, est commandé par une girouette et une dynamo tachymètres entraînée par l'éolienne.

La girouette, fixée sur le corps de l'éolienne à l'amont de l'hélice, porte un bras conducteur qui se déplace sur un rhéostat horizontal solidaire du corps de l'éolienne. La d.d.p. entre le point milieu de ce rhéostat et le bras conducteur est appliquée à travers une résistance, à un amplificateur.

La dynamo tachymétrique qui fournit une tension proportionnelle à la vitesse de rotation, alimente un circuit qui comporte la résistance, un redresseur et une batterie placée en opposition. Tant que la vitesse de rotation de l'hélice est inférieure à la vitesse nominale, la tension aux bornes de dynamo tachymétrique est plus faible que la tension aux bornes de la batterie, la dynamo ne débite aucun courant. Le moteur d'orientation se met en route jusqu'à ce que l'éolienne vienne exactement se placer dans la direction du vent.

Si la vitesse de l'éolienne est trop importante, la dynamo débite un courant qui provoque une chute de tension dans la résistance. Le moteur d'orientation entre en action, l'axe de l'éolienne s'écarte progressivement du lit du vent jusqu'à la somme des d.d.p aux bornes de la résistance et la position nominale s'annulent. Il en résulte une limitation de la vitesse de rotation de l'éolienne par diminution de la surface offerte au vent.

Ce dispositif protège l'éolienne contre l'emballement résultant de la suppression ou de la réduction de la charge sur l'axe de l'hélice.

4.5. Dispositifs de protection et de régulation

Quel que soit le type d'aéromoteur, il est nécessaire pour éviter sa destruction lorsque les vents sont trop violents qu'il soit équipé d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine.

Les systèmes peuvent agir de façons différentes et plus ou moins fines avec un degré d'automatisme nul ou intégral.

On peut classer les solutions adoptées en deux catégories : la régulation à pales fixes et la régulation à pales orientables.

4.5.1.1. Régulation à pales fixes

Plusieurs modèles ont été mis au point, nous citerons :

- Système de freinage manuel ;
- Dispositifs à empennage articulé ;
- Système de freinage automatique ;
- Système de régulation par frein aérodynamique centrifuge.

1. Système de freinage manuel

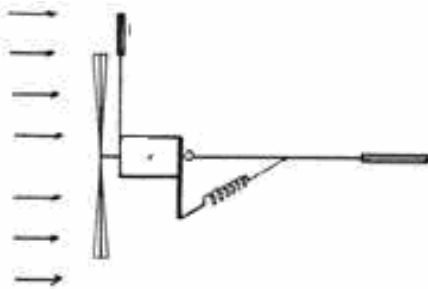
C'est le moyen le plus simple de préserver une machine de la destruction. Lorsque le vent atteint une certaine force, un opérateur immobilise la machine soit à l'aide d'un frein, soit en plaçant l'hélice parallèle au vent (mise en drapeau), soit en modifiant le calage des pales pour obtenir un couple moteur nul (système le plus efficace).

2. Dispositif à empennage articulé

Les deux moyens cités précédemment peuvent être automatiques par action du vent sur une « palette » de commande. La palette annexe est parallèle et solidaire du plan de rotation de l'hélice (voir figure 29). Lorsque la pression du vent sur cette palette, proportionnelle au carré de la vitesse et à la surface de la palette, $k SV^2$, $k \sim 0,9$, atteint un certain seuil, elle peut entraîner la commande d'un frein ou la mise en drapeau.

Ce dispositif peut être associé à un ressort qui replace l'hélice dans sa position normale lorsque l'action du vent sur la palette annexe a cessé.

Ces systèmes ne peuvent être utilisés qu'avec des aéromoteurs dont la vitesse de rotation n'a pas à être constante. D'autre part ils présentent l'inconvénient majeur d'interrompre le fonctionnement de l'aéromoteur au-delà d'une certaine vitesse de vent.



L'action du vent sur l'empennage est insuffisante pour faire pivoter l'hélice.



L'action du vent sur l'empennage est suffisante pour provoquer l'effacement partiel de l'hélice.

Fig 29. Dispositif à empennage articulé

3. Système de freinage par effacement

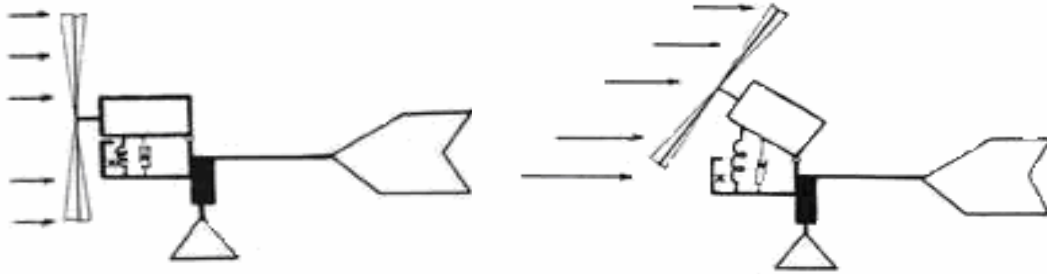


Fig 30. Système de régulation par effacement total ou partiel du rotor.

Ce dispositif (figure 30) est utilisé dans les installations éoliennes de production d'électricité de la compagnie américaine Dunlite (Iowa – USA).

L'axe de rotation de l'éolienne et le générateur électrique entraîné sont fixés sur une pièce métallique articulée autour d'un axe horizontal perpendiculaire au plan de symétrie de l'installation.

En régime normal, l'axe de rotation de l'éolienne et l'alternateur sont maintenus horizontaux. Mais lorsque l'intensité du vent augmente, l'axe de l'éolienne s'incline jusqu'à ce que le moment de la poussée axiale qui n'est pas nul par rapport à l'axe de basculement équilibre l'action du ressort et celle du poids de l'équipage hélice alternateur.

Par suite de la réduction de la surface offerte au vent qui est d'autant plus marquée que l'intensité du vent est élevée, la vitesse de rotation de l'éolienne se trouve limitée.

4. Système de régulation par frein aérodynamique centrifuge

Il existe différents types de systèmes de régulation par frein aérodynamique centrifuge :

- Système Windchanger ;
- Système Paris-Rhône ;
- Système Aérodynamo

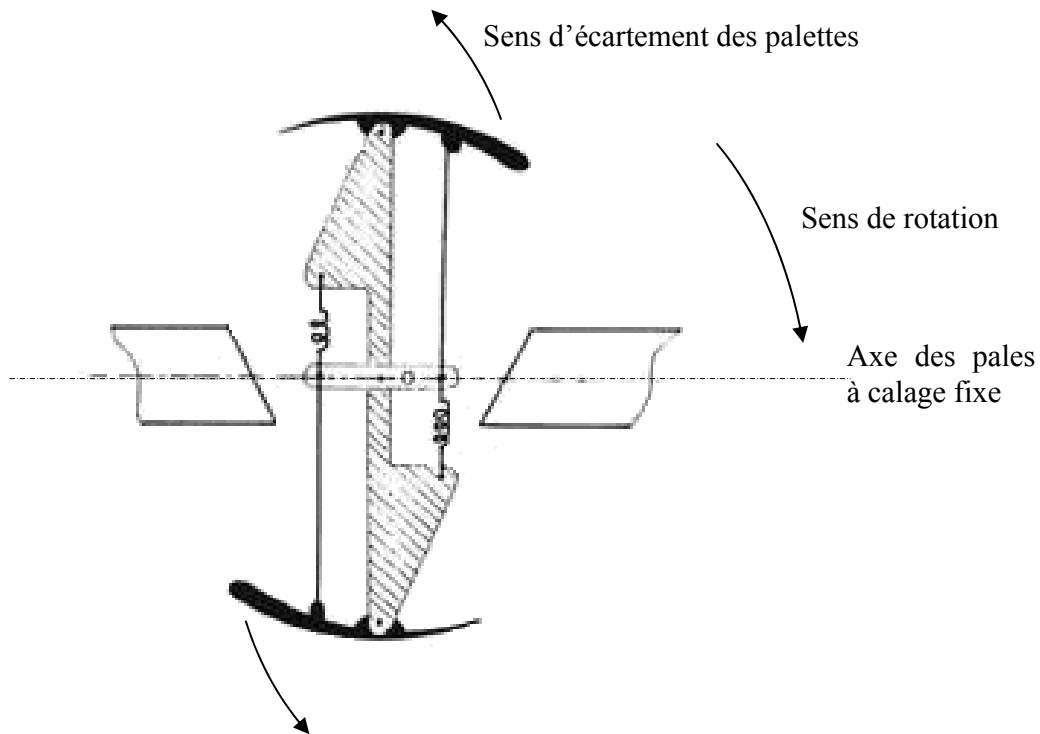


Fig 31. Régulation par frein aérodynamique (système Windchanger)

Nous n'allons décrire que le système Windchanger (figure 31) comme exemple pour mettre en évidence le fonctionnement de ce moyen de régulation.

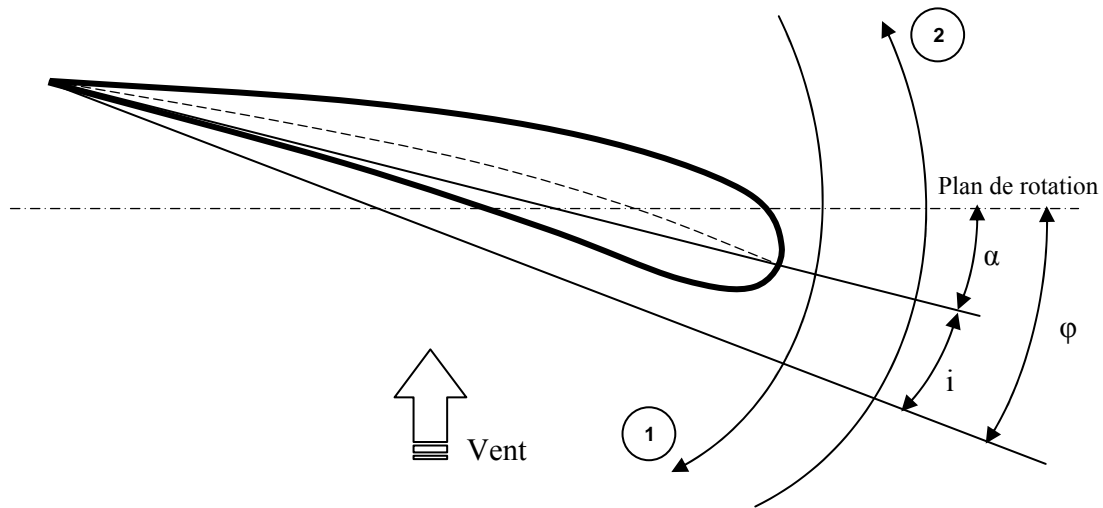
Ce système fonctionne sous l'action de la force centrifuge, il est monté sur l'axe de l'hélice. Il est constitué par deux plaques courbées, articulées sur des bras diamétralement opposés calés à 90° par rapport à l'hélice supposée bipale. La partie avant des palettes plus lourde et plus longue que la partie arrière, est reliée à un ressort.

Si la vitesse du vent est inférieure à $8,5 \text{ m/s}$, le régulateur n'intervient pas, les palettes étant maintenues en position concentrique par des ressorts.

Lorsque la vitesse du vent dépasse $8,5 \text{ m/s}$, les ailerons du régulateur s'ouvrent automatiquement sous l'action de la force centrifuge. La pression de l'air qui vient s'exercer aussi renforce l'effet de cette dernière. L'ensemble agit comme un frein aérodynamique et maintient la vitesse

constante. Si la vitesse de rotation décroît, la pression du vent sur les palettes diminue, l'action des ressorts l'emportent et les palettes se rapprochent de la position initiale et l'effet de freinage s'en trouve réduit.

4.5.1.2. Régulation à pales orientables



- ① Régulation par mise en drapeau, varier α nominal à 90° .
- ② Régulation par décrochage aérodynamique, varier α nominal à -10 environ.

Fig 32. Régulation par variation de l'angle de calage

La résultante des forces aérodynamiques appliquées à chaque élément de pale dépend de l'angle d'incidence i , qui dépend du rapport entre la force de portance et celle de traînée

La régulation consiste à conserver la force axiale constante, pour toute une gamme de vitesse du vent admissible par la machine. Cette régulation est possible en faisant varier l'angle de calage α de façon à ce que la caractéristique de la machine (vitesse spécifique λ) soit de tel sorte à recueillir le maximum de puissance.

1. Régulation par mise en drapeau

Lorsque la fréquence de rotation augmente du fait d'un accroissement de la vitesse du vent, on augmente l'angle de calage, l'angle d'incidence i diminue et par la même occasion le rapport C_z/C_x , soit F_z/F_x diminue, ce qui entraîne le ralentissement de l'hélice, une diminution de la force centrifuge et donc de la fréquence de rotation.

Ce dispositif n'est pas très précis car pour diminuer le rapport C_z/C_x , il faut provoquer une variation importante de α , mais il présente l'avantage de limiter les contraintes sur les pales par fort vent car les forces de portance et de traînée diminuent simultanément.

2. Régulation par décrochage aérodynamique

Le principe est identique au système de régulation par mise en drapeau, mais dans ce cas, on provoque une diminution de α , ce qui entraîne une augmentation de l'angle d'incidence.

On se situe sur la pente descendante de variation du rapport C_z/C_x en fonction de i , de l'autre côté de l'incidence optimum par rapport au système précédent.

Pour ce système très intéressant, on obtient de grandes variations de C_z/C_x pour de faibles variations de α , toutefois, le profil de la pale se trouve toujours placé normalement à l'écoulement des forts vent, ce qui provoque une augmentation de la force de traînée et de grandes charges sur les pales et leurs fixations.

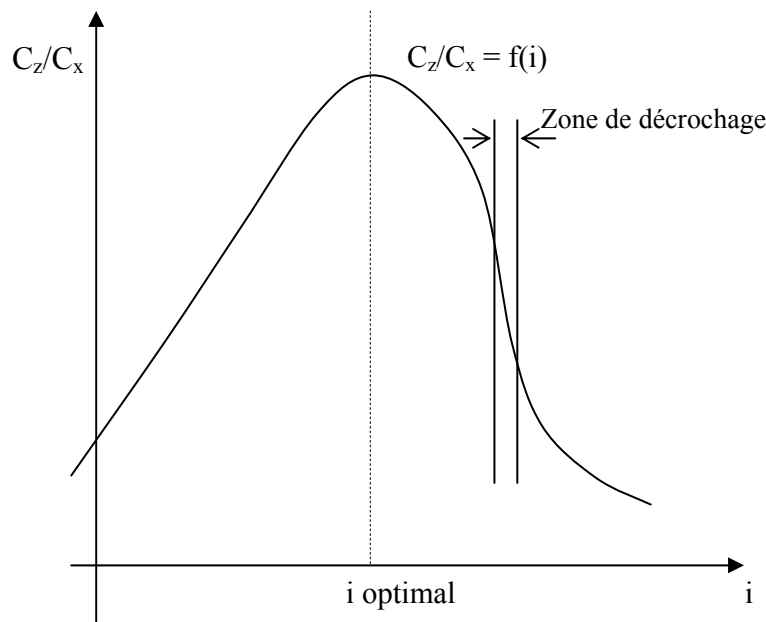


Fig 33. Variation de C_z/C_x en fonction de l'angle d'incidence

3. Régulation par asservissement du calage

Les deux systèmes précédents peuvent fonctionner par commande directe du calage, un vérin hydraulique dans l'arbre porte-hélice creux par exemple.

Le vérin modifie le calage des pales en fonction de la vitesse de rotation du rotor. Ce système, plus souple mais techniquement plus complexe, est réservé aux grandes machines.

4. Régulation par décrochage

Ce système utilise les propriétés de la caractéristique C_z/C_x en fonction de i , qui, pour certains profils adaptés à cette régulation présente une chute brutale au-delà d'un certain angle d'incidence i correspondant à la création de turbulence sur les pales.

Avec une hélice à calage fixe, freinée par le récepteur (alternateur ou dynamo) on obtient une augmentation de l'angle d'incidence lorsque le vent réel croît. En effet, du fait du freinage du récepteur, la fréquence de rotation n'augmente pas et le vent relatif se rapproche du vent réel.

Si i augmente suffisamment, on atteint la zone de la caractéristique où C_z/C_x chute brutalement (voir figure 33), provoquant une chute du couple moteur.

Ce système ne permet pas d'utiliser des vents faibles, puisque le vent réel doit atteindre des valeurs assez élevées (~ 15 m/s) et nécessite des pales au profil bien adapté, généralement vrillées.

4.6. Le multiplicateur

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur.

Trois types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

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

4.7. Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne

Une caractéristique essentielle du vent étant la discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet d'étudier et la mise au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée directement pendant les périodes de production afin d'en restituer une partie, aussi grande que possible, pendant les périodes de calme.

L'irrégularité de l'énergie éolienne est l'un des principaux inconvénients qui ralentissent son développement, car ce stockage, d'autant plus important que les régimes du vent sont irréguliers, constitue souvent une grande part de l'investissement (environ 20%) d'une installation de fourniture d'énergie électrique à partir du vent [15].

Il existe différentes possibilités de stockage :

4.7.1.1. Les batteries d'accumulateurs au plomb

Pour la production d'électricité, le système le plus utilisé est celui des batteries d'accumulateurs. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus.

La batterie au plomb a été inventée en 1859 par le Français Gaston Planté. Elle n'a subi jusqu'à aujourd'hui que des modifications destinées à améliorer ses performances.

Constitution :

- Le banc est en matière isolante, verre ou matière plastique.
- Les plaques sont faites de grilles au plomb antimoine¹ dans les mailles desquelles se trouve la matière active sous forme de pâte.
- Electrode positive – anode : 75 % de minium (Pb_3O_4) + 25 % de litharge (PbO).
- Electrode négative – cathode : 25 % de minium (Pb_3O_4) + 75 % de litharge (PbO).
- L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique dont la densité est maximale en fin de charge (~ 30 %) et minimale en fin de décharge (~ 16 %).

Principe de fonctionnement :

En fonctionnement, l'électrode négative au plomb produit des électrons libres et des cations (ions positifs) de plomb. Les électrons parcourent le circuit électrique extérieur et les cations de plomb

TP¹PT Elément semi métallique de numéro atomique 51

se combinent avec les anions (ions négatifs) sulfates dans l'électrolyte, pour former le sulfate de plomb. Lorsque les électrons retournent dans la cellule par l'électrode positive, une nouvelle réaction a lieu. L'oxyde de plomb se combine avec les ions hydrogène dans l'électrolyte et avec les électrons pénétrant dans la cellule pour former de l'eau et libère des cations de plomb dans l'électrolyte pour former du sulfate de plomb.

Une batterie au plomb se décharge lorsque l'acide sulfurique se transforme progressivement dans l'eau et que les électrodes se transforment en sulfate de plomb. Lorsque la cellule est rechargée, les réactions chimiques décrites précédemment s'inversent jusqu'à ce que les produits chimiques aient retrouvé leur état originel. Une batterie au plomb a une durée de vie utile d'environ quatre ans. La capacité de l'accumulateur est le produit de l'intensité de décharge par la durée de fonctionnement ; elle s'exprime en Ah et correspond à la quantité d'électricité que le dispositif peut restituer. On définit également la capacité massique de l'accumulateur : c'est la capacité de l'accumulateur par kilogramme de réactif chimique utilisé. Les batteries au plomb les plus performantes fournissent environ 30 Ah/kg, et de 40 à 45 Wh/kg (énergie massique), lors d'une décharge totale durant cinq heures. Aux basses températures (inférieures à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), la capacité d'un accumulateur diminue.

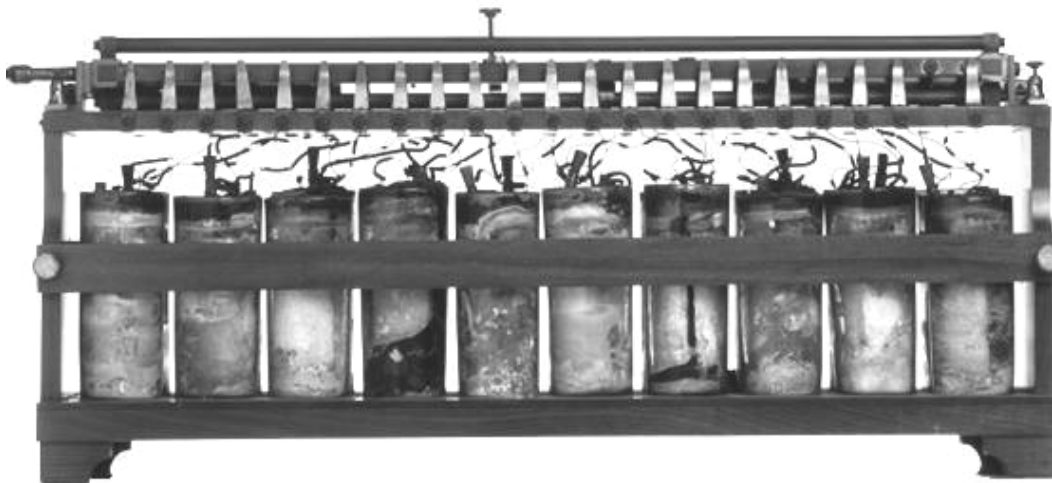


Fig 34. Batterie d'accumulateurs au plomb

4.7.1.2. Les accumulateurs alcalins

Ils existent sous deux formes : les accumulateurs au nickel-cadmium et les accumulateurs à l'argent-zinc.

1. Accumulateurs au nickel cadmium et au nickel fer

Ils résultent des travaux de l'Américain Thomas Edison et de différents scientifiques français dans les années 1900. Le principe de fonctionnement de ces accumulateurs est analogue à celui de la batterie au plomb. Les seules différences : les électrodes sont des plaques d'hydrate de nickel et de cadmium, ou d'hydrate de nickel et de fer ; l'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium (potasse), qui sert uniquement à assurer le transfert des ions. La tension aux bornes de ces accumulateurs est de 1,25 V. Ils débitent des courants de grande intensité, mais ont une durée de vie assez courte.

2. Accumulateurs à l'argent zinc

Ils ont été mis au point en 1941, par H. André. L'électrolyte est une solution de potasse dans laquelle plongent l'électrode positive, essentiellement en oxyde d'argent et une électrode négative à base de zinc. Aux bornes de ces accumulateurs, on mesure une tension de 1,5 V. Ils ont une énergie massique de 120 Wh/kg, soit 3 fois celle des accumulateurs précédents. Cependant, en raison de leur coût élevé, on les utilise pour des applications spécifiques.

4.7.1.3. Le volant d'inertie

L'énergie produite par l'éolienne est utilisée pour faire tourner un volant d'inertie plus ou moins sophistiqué pouvant tourner à 18 000 tr/mn sur des paliers magnétiques. Pratiquement, l'énergie stockée est de l'ordre de 50 à 70 W/kg, avec un rendement de l'ordre de 80 %.

Si le volant d'inertie présente des avantages tels que la maintenance réduite, énergie immédiatement utilisable sous différentes formes, bon rendement, il n'est pas encore à la portée des particuliers.

4.7.1.4. Production d'hydrogène

L'énergie électrique produite par un aérogénérateur peut être utilisée pour effectuer directement l'électrolyse de l'eau afin d'obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène, l'hydrogène pouvant être utilisé comme gaz de combustion sur place ou transporté, l'hydrogène est aussi utilisé dans les piles à combustibles.

4.7.1.5. Stockage thermique

L'énergie produite est utilisée pour chauffer le fluide d'un réservoir qui restituera pendant les périodes sans vent l'énergie stockée. Ce mode de fonctionnement est surtout étudié dans l'optique d'une association avec l'énergie solaire pour le chauffage.

4.7.1.6. L'air comprimé

L'énergie éolienne est utilisée dans ce cas pour comprimer de l'air. Cet air peut être utilisé directement ou comme carburant dans une turbine à gaz.

4.7.1.7. Réserve hydraulique

L'énergie éolienne sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie. Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre deux réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé.

Ces modes de stockage font l'objet d'études et d'essais dans différents pays, mais ils restent difficilement exploitables par le particulier qui le plus souvent aura recours aux batteries d'accumulateurs au plomb classiques qui sont :

- D'un emploi souple ;
- Facile à utiliser car l'énergie stockée est immédiatement exploitable ;
- D'une maintenance réduite ;
- Utilisables n'importe où et ne nécessitant pas de protection particulière.

5. Utilisation de l'énergie éolienne

Au tout début, l'énergie éolienne a été utilisée dans la propulsion des bateaux à voiles, la ventilation naturelle des maisons, le séchage du linge, la mouture du grain ou pour assèchement et le drainage des polders employé en Hollande. Actuellement, elle est essentiellement destinée à deux usages qui sont la production de l'électricité et le pompage de l'eau.

5.1. Production d'énergie mécanique

Aujourd'hui, la production d'énergie mécanique à partir du vent est devenue monnaie courante, elle est essentiellement destinée au pompage de l'eau. Cette application bien qu'ancienne, continue d'être utilisée et connaît même un regain d'intérêt avec les économies d'énergie et l'incitation à l'utilisation des énergies renouvelables.

La machine doit avoir un couple de démarrage élevé, pour cela le capteur est une hélice multipales (éolienne américaine) ou un rotor à axe vertical du type Savonius.

L'éolienne est généralement associée à une pompe à piston placée dans le puits ou le forage, et entraînée par un train de tige mû par un système bielle manivelle solidaire de la roue éolienne.

La dimension de la manivelle définit la course, donc le débit, mais aussi le couple à vaincre par la roue pour assurer le mouvement du piston. Son inconvénient est toutefois de présenter une irrégularité de couple entre les deux courses. Pour régulariser le couple, on utilise des dispositifs extérieurs : levier, poids, ressort. Ce dernier est intéressant, car il évite les articulations supplémentaires et réduit les frottements.

La hauteur manométrique maximale la plus répandue chez les constructeurs d'éoliennes multipales est de 40 m, mais en fait, la plupart des éoliennes rencontrées fonctionnent avec des hauteurs totales comprises entre 7 et 10 m [6], pour des raisons de coût par rapport à d'autres solutions (moteur Diesel par exemple).

Ce type de machines ne supporte pas les vitesses de rotation trop importante car le dispositif d'entraînement mécanique bielle-manivelle-tige est inadapté aux survitesses, pour cela, il faut que le système de régulation par vent fort soit efficace.

L'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau est une solution intéressante dans des sites isolés, lorsque le réseau électrique est éloigné, l'exemple le plus significatif est le Sahara algérien, là où les sources d'eau sont principalement souterraines, le site est généralement venté et le relief adéquat pour une installation éolienne (figure 35).

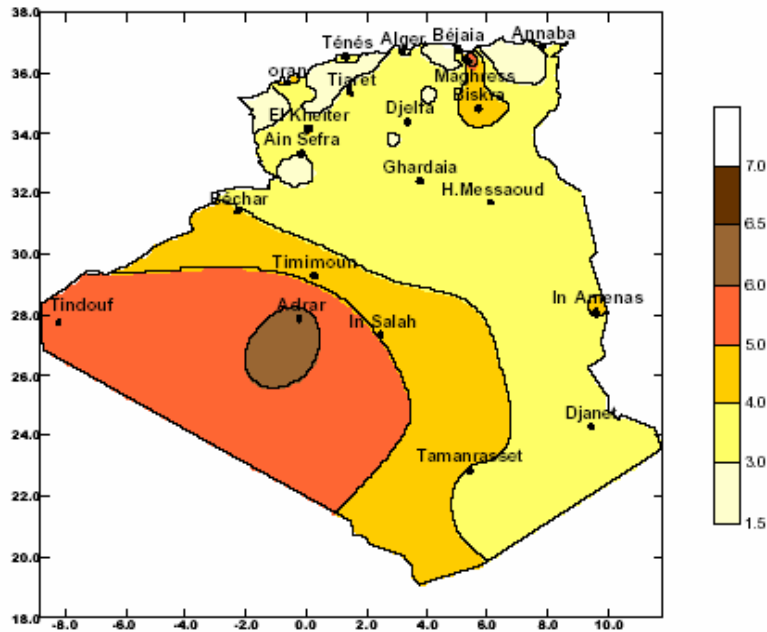


Fig 35. Carte annuelle de la vitesse du vent à 10m du sol (m/s).

5.2. Production d'électricité : Les aérogénérateurs

La production d'électricité à partir du vent est devenue un domaine en pleine expansion, le choc pétrolier a remis en question le problème des ressources énergétiques nationales, en particulier en Europe et aux Etats-Unis, sans oublier les complications environnementales qu'engendre l'utilisation des énergies fossiles et nucléaires tel que l'effet de serre et les déchets radioactifs.

Plusieurs prototypes géants ont été mis sur pied mais il s'est révélé que la solution la mieux adaptée était celle qu'avait choisie les danois, c'est à dire une éolienne tripales à axe horizontal face au vent [7] en donnant une base industrielle suffisante au développement de la filière pour augmenter la puissance et le rendement des aérogénérateurs tout en diminuant le prix de la machine et celui de son installation.

La production d'électricité sur réseau est devenue la principale application de l'énergie éolienne, c'est maintenant une activité industrielle et commerciale à part entière et en pleine croissance, +19 % par an d'électricité produite de 1988 à 1995, année où la production mondiale a dépassé les 9 TWh et où le marché mondial a dépassé le gigawatt [20], menant à un parc mondial de plus de 5 GW avec une chute considérable du prix de revient du kWh (moins de 0,4 F/kWh en 1997 au lieu de 2 F/kWh au début des années 1980) on prévoit même une baisse allant jusqu'à 0,26

F/kWh en 2005 sur un bon site [8], ce qui laisse bien augurer la pérennité du développement de ce marché sur le long terme.

Donc les aérogénérateurs à rotor tripales et à axe horizontal sont les mieux adaptés pour la production d'énergie électrique car ils tournent à vitesse élevée et ont le meilleur rendement par rapport à l'énergie maximum récupérable sur un rotor éolien définie par la théorie de Betz.

La plupart des stations éoliennes destinées à la production de l'énergie électrique ont une configuration qui correspond à l'organigramme de la figure 36.

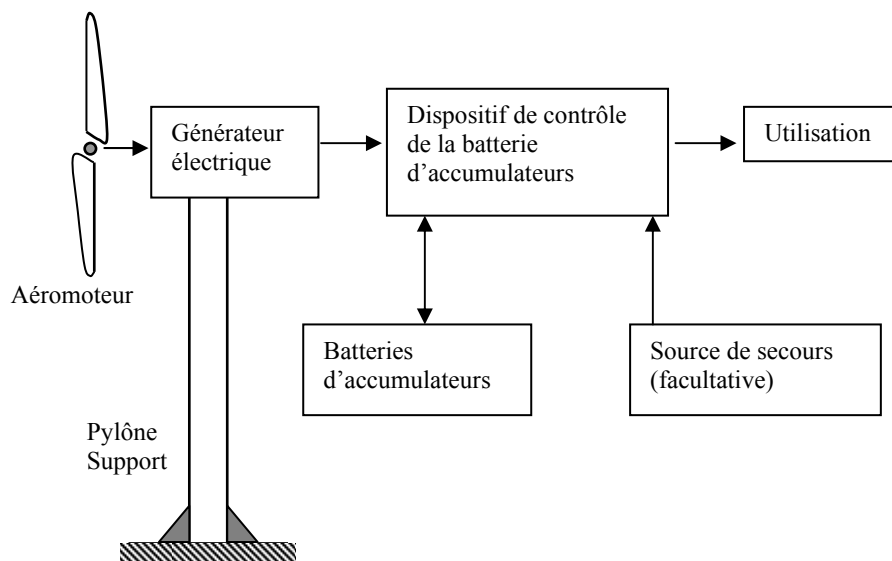


Fig 36. Organigramme d'une section de fourniture d'énergie électrique par aérogénérateur

Un aérogénérateur est constitué de :

5.2.1. Une nacelle

- Un aéromoteur à deux ou trois pales pourvu d'un système de régulation conférant à l'hélice une fréquence (vitesse) de rotation stable à partir d'une certaine vitesse de vent, et éventuellement un système de sécurité destiné à arrêter la machine en cas de tempête si le système de régulation est inopérant au delà de certaines vitesses du vent.
- Un générateur électrique qui peut être soit directement accouplé à l'aéromoteur qui est le cas le plus simple, l'hélice est montée directement sur l'axe du générateur électrique ; soit entraîné par un multiplicateur placé entre l'aéromoteur et le générateur électrique. La fréquence

de rotation est liée au diamètre de l'hélice et elle diminue lorsque le diamètre augmente. Pour garder un bon rendement du générateur électrique, il est donc nécessaire d'augmenter la fréquence de rotation obtenue avec l'aéromoteur avant d'entraîner le générateur électrique. Ce générateur pourra être soit une dynamo fournissant un courant continu directement utilisable pour charger une batterie, soit un alternateur. Pour des raisons de coût et de rendement, les constructeurs d'aérogénérateurs s'orientent de plus en plus vers l'utilisation des alternateurs.

- Un pivot d'orientation qui permet à la machine de présenter l'hélice au vent quelle que soit sa direction.
- Un carter ou bâti qui enveloppe, protège et relie entre elles l'ensemble des pièces.

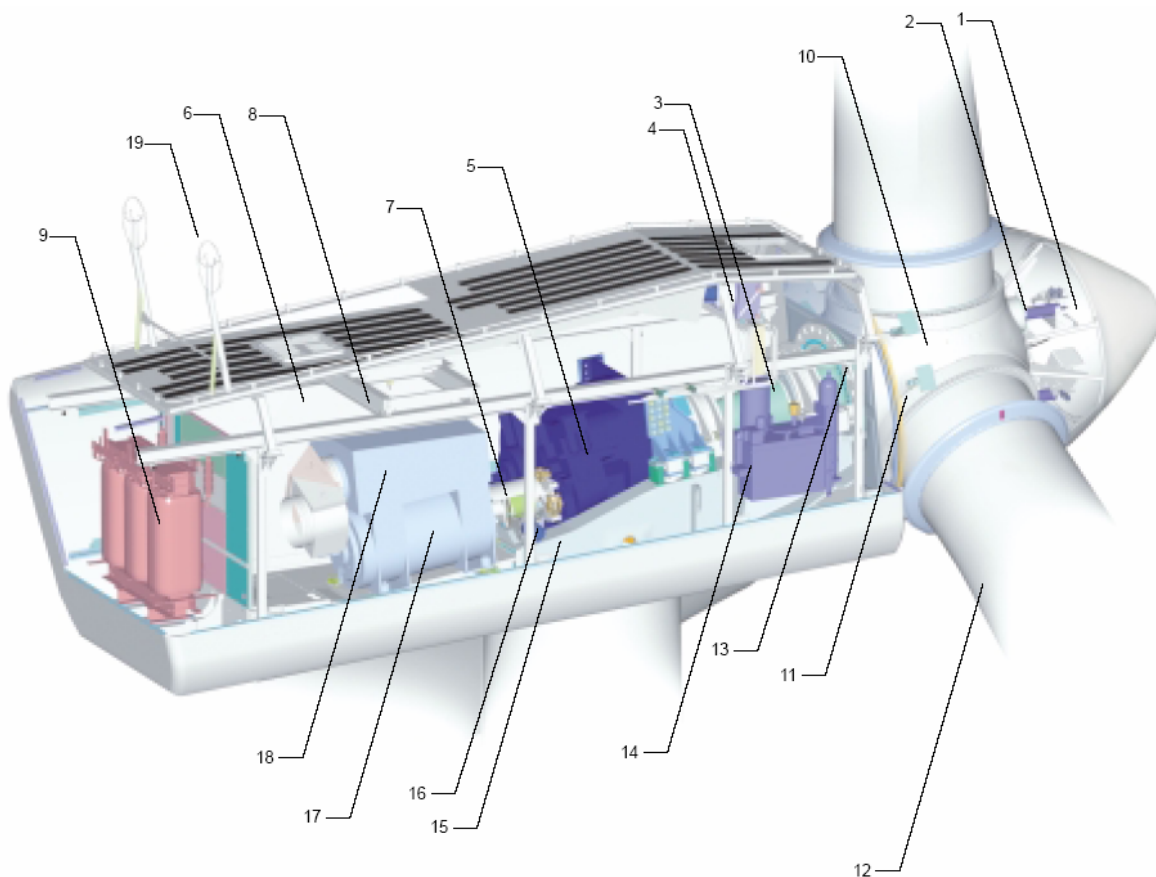


Fig 37. Coupe de la nacelle d'un aérogénérateur (Vesta OptiSpeed)

1. Régulateur au moyeu
2. Vérin de réglage de pas
3. Arbre principal
4. Refroidisseur d'huile

5. Multiplicateur
6. Régulateur supérieur VMP avec convertisseur
7. Frein
8. Treuil
9. Transformateur
10. Moyeu de pale
11. Roulement de pale
12. Pale
13. Système de verrouillage de rotor
14. Bloc hydraulique
15. Châssis
16. Moteur d'orientation
17. Alternateur OptiSpeed™
18. Système de refroidissement de la génératrice
19. Capteur ultrasonique

5.2.2. Un pylône support d'aérogénérateur

Bien que mécaniquement simple, le pylône support d'aérogénérateur est une partie importante de l'installation pour différentes raisons :

- Sa hauteur : l'aérogénérateur doit se trouver en dehors des perturbations dues au sol et aux obstacles environnants.
- Sa fréquence propre. Une machine tournante est toujours de siège de vibrations, il est donc essentiel que la fréquence propre du pylône soit différente des vibrations engendrées par l'aérogénérateur.
- Sa conception vis-à-vis de l'entretien. Si le pylône support ne permet pas un entretien et des visites faciles, la machine sera mal entretenue et sa durée de vie réduite.
- Sa robustesse. Le pylône devra être calculé pour résister soit à des surcharges dues par exemple au givre, soit à des contraintes dues à un fonctionnement temporairement anormal de l'aérogénérateur.
- Sa forme. Dans le cas de l'aéromoteur sous le vent, il est particulièrement important d'avoir recours à des pylônes à faible traînée. Le passage de l'hélice dans la zone d'écoulement perturbée

par le pylône provoque une fatigue mécanique sur les pales et des vibrations préjudiciables au bon fonctionnement de l'aérogénérateur.

5.2.3. Un dispositif de stockage de l'énergie produite

Dans la plupart des cas, la station devra comporter un moyen de stockage d'énergie pour couvrir les périodes sans vent, le moyen de stockage le plus facile et moins coûteux à mettre en œuvre reste les batteries d'accumulateurs au plomb.

Pour les machines de moyennes et de grande puissance (> 100 kW) raccordées au réseau de distribution, il n'y a pas de stockage, l'énergie produite est directement consommée.

5.2.4. Un Dispositif de contrôle des batteries d'accumulateurs

Si la batterie d'accumulateurs au plomb est encore le moyen de stockage le moins coûteux et le plus facile à mettre en œuvre, il reste néanmoins nécessaire d'une surveillance régulière.

L'accumulateur au plomb est très sensible aux décharges prolongées et aux surcharges, il est donc important de mettre en place dans toute station utilisant ce mode de stockage un moyen manuel ou automatique de surveillance de la batterie d'accumulateurs.

Ce dispositif devra donc assurer en priorité :

- La coupure du courant de décharge de la batterie d'accumulateurs lorsqu'elle est complètement déchargée ;
- La coupure du courant de charge de la batterie d'accumulateurs lorsqu'elle est complètement chargée ;
- La commutation de l'utilisation sur la source de secours, lorsqu'elle existe, et que la batterie est déchargée ;
- La protection des différents éléments de la station par des fusibles appropriés ;

5.2.5. Une source de secours

Selon la puissance de l'aérogénérateur, le type d'utilisation et les régimes de vent, on peut être conduit à utiliser une source de secours soit pour garantir le fonctionnement continu de l'utilisation même en cas de défaillance de l'aérogénérateur, soit pour diminuer le stockage.

Selon les puissances, la source de secours peut être :

- Une batterie de piles chimiques ;
- Un moteur thermique essence ou diesel ;
- Une batterie d'accumulateurs chargée par des cellules photovoltaïques.

6. Conclusion

Bien qu'il existe de nombreuses sortes de capteurs éoliens, seuls les capteurs à axe horizontal de type « éolienne rapide » sont voués à un avenir pour la production d'énergie électrique à grande échelle. Les recherches effectuées par l'aéronautique dans le domaine de l'aérodynamique et les systèmes de régulation automatique des pales pour obtenir une vitesse de rotation des pales à peu près constante quelle que soit la vitesse du vent supérieure à la vitesse de démarrage, ont permis d'accroître considérablement le rendement des éoliennes à tel point que l'on atteint aujourd'hui des rendements approchant les 50 %. Mais l'utilisation de systèmes de carénage permet d'élargir la surface balayée et donc dépasser le fameux 59 % défini par Betz. De plus les éoliennes sont de plus en plus puissantes (plusieurs mégawatts par éoliennes).

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents types de moteurs éoliens et leurs modes de classification, selon leur axe de rotation qu'il soit horizontal ou vertical ou bien selon leur vitesse spécifique λ . On est arrivé à calculer la limite de Betz qui est de 59 % par rapport à l'énergie cinétique du vent, et à déterminer le coefficient d'interférence axial optimal qui est de 1/3, c'est-à-dire que, dans un cas idéal, la vitesse du vent à l'aval de l'hélice sera égale à 1/3 de la celle à l'amont.

La production de l'électricité nécessite une vitesse de rotation importante sur l'arbre de l'alternateur, donc une vitesse spécifique importante, de l'ordre de 6, le type d'éoliennes adaptées à ce mode de fonctionnement est les éoliennes rapides car elles sont légères et économiques puisqu'elles possèdent un nombre de pales réduit (deux ou trois) et un rendement important par rapport aux autres machines.

Chapitre IV

Etude aérodynamique des rotors éoliens à axe horizontal

1. Introduction

La partie la plus importante d'une éolienne est constituée par les pales car c'est sur elles que s'exercent les efforts aérodynamiques et donc dépend le rendement de la machine.

La construction des pales pose deux sortes de problèmes :

- L'étude aérodynamique de la pale, choix du profil, sa largeur, le calage et le nombre de pales ;
- Le dimensionnement de la pale du point de vue de la résistance des matériaux.

Notre étude sera consacrée exclusivement à l'étude aérodynamique pour déterminer les paramètres géométriques de la pale, c'est-à-dire la corde et l'angle d'inclinaison de l'élément de pale, ainsi que l'angle de vrillage tout au long de la pale.

Dans le but de résoudre ce problème, diverses théories ont été élaborées. Nous citerons les théories établies par Sabinin, Stefanik, Hütter et Glauert, ce dernier fait intervenir dans sa théorie les tourbillons liés aux pales et les tourbillons libres qui s'en détachent, elle est encore appelée la méthode tourbillonnaire.

La méthode tourbillonnaire fut appliquée pour la première fois aux calculs des hélices d'avion, ce n'est que par la suite qu'elle fut utilisée dans l'analyse des rotors éoliens à axe horizontal.

Elle permet la détermination des caractéristiques aérodynamiques des rotors éoliens en combinant deux approches, à savoir la théorie de l'élément de pale et les lois de conservation de la quantité de mouvement.

2. Evaluation des actions aérodynamiques s'exerçant sur l'élément de pale

2.1. Efforts de portance et de traînée

L'action de l'air sur le corps se traduit par une force résultante F généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative. Cette force s'appelle action aérodynamique totale ou plus simplement résistance de l'air. Cette force F a pour expression :

$$F = \frac{1}{2} C_p S V^2 \quad (\text{III.24})$$

S est la surface caractéristique de l'élément, produit de la longueur de la corde par la longueur de la pale.

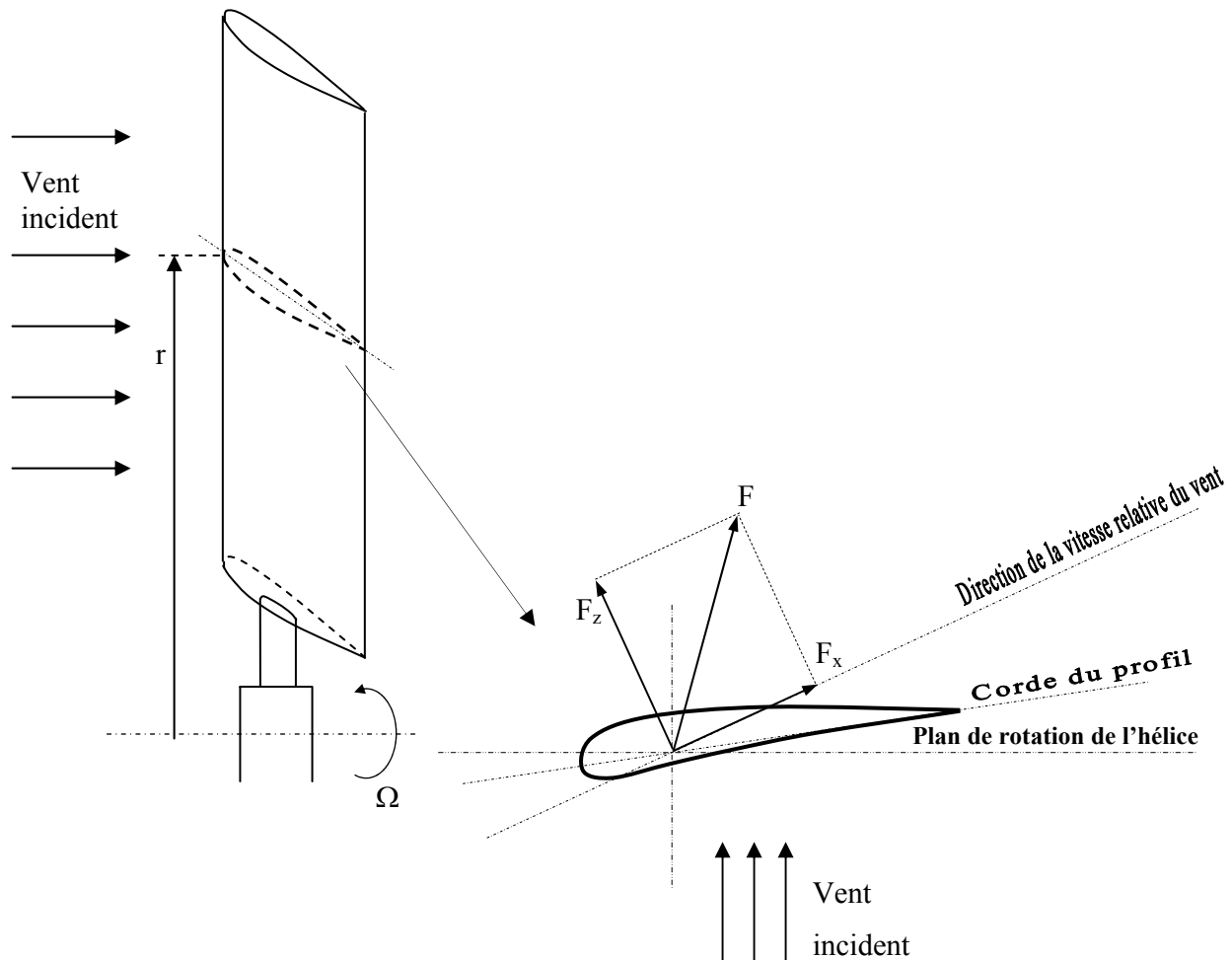


Fig 38. Représentation des efforts de portance et de traînée appliqués sur un élément de pale

Pour l'études des actions aérodynamiques, il est commode d'évaluer les projections de la force résultante F sur un système d'axes liés à la vitesse relative W . on définit ainsi :

- Une composante F_z normale à la vitesse W orientée positivement de bas en haut et appelée portance.

$$F_z = \frac{1}{2} C_z \rho S W^2 \quad (\text{IV.1})$$

- Une composante F_x parallèle à la vitesse W et appelée traînée.

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho S W^2 \quad (\text{IV.2})$$

D'après le théorème de Pythagore, on peut écrire :

$$F_x^2 + F_z^2 = F^2 \quad (\text{IV.3})$$

Et par conséquent :

$$C_x^2 + C_z^2 = C^2 \quad (\text{IV.4})$$

2.1.1. Triangle des vitesses

A partir du triangle des vitesses (figure 39), on déduit :

La vitesse d'entraînement des éléments de pales comprise entre les cylindres de rayons r et $r + dr$ est $U = r\Omega$.

Du point de vue aérodynamique, tout se passe comme si l'air arrivait sur le profil suivant une direction résultante de la composition de sa vitesse incidente V et de la vitesse tangentielle $u = \omega r$ à la distance r de l'axe. Entre la vitesse absolue du vent V à la traversée de l'éolienne, la vitesse relative du vent W par rapport aux profils d'aile considérés et la vitesse d'entraînement u existe la relation :

$$\vec{W} = \vec{V} + \vec{u} \quad (\text{IV.5})$$

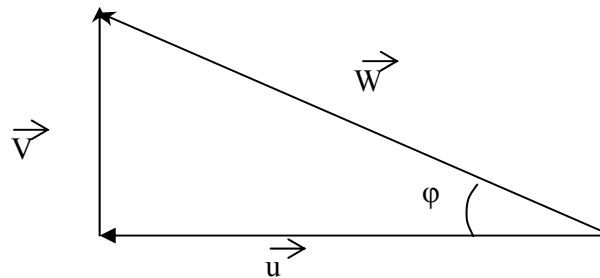


Fig 39. Triangle des vitesses

Donc le module de la vitesse relative W est égal à :

$$W = \sqrt{V^2 + u^2} \quad (\text{IV.6})$$

Remarque

Le triangle des vitesses de la figure 39 représente les vitesses du fluide. Pour ce qui est de la vitesse tangentielle du rotor qui est Ωr , elle est dans le sens contraire de celle du vecteur vitesse tangentielle \bar{u} .

L'air arrive avec la direction axiale et acquiert au passage de l'hélice une composante tangentielle telle que la vitesse de déplacement effectivement induite :

$$U = \Omega r(1 + a') \quad (\text{IV.7})$$

En considérant la limite de Betz, la vitesse absolue sur l'hélice est égale :

$$V = V_1(1 - a) \quad (\text{IV.8})$$

A partir des équations (IV.7) et (IV.8), on peut écrire :

$$W = \sqrt{(\Omega r(1 + a'))^2 + (V_1(1 - a))^2} \quad (\text{IV.9})$$

En introduisant la vitesse spécifique de la formule (III.1), la vitesse relative devient :

$$W = V_1 \sqrt{(1 - a)^2 + (1 + a')^2 \lambda^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2} \quad (\text{IV.10})$$

En fonction de l'angle φ , la vitesse relative devient :

$$W = V_1 \frac{(1 - a)}{\sin \varphi} \quad (\text{IV.11})$$

Où l'angle φ est égal à :

$$\varphi = \arctg \frac{R}{r} \frac{(1 - a)}{\lambda(1 + a')} \quad (\text{IV.12})$$

2.2. Etude de la poussée axiale et du couple moteur

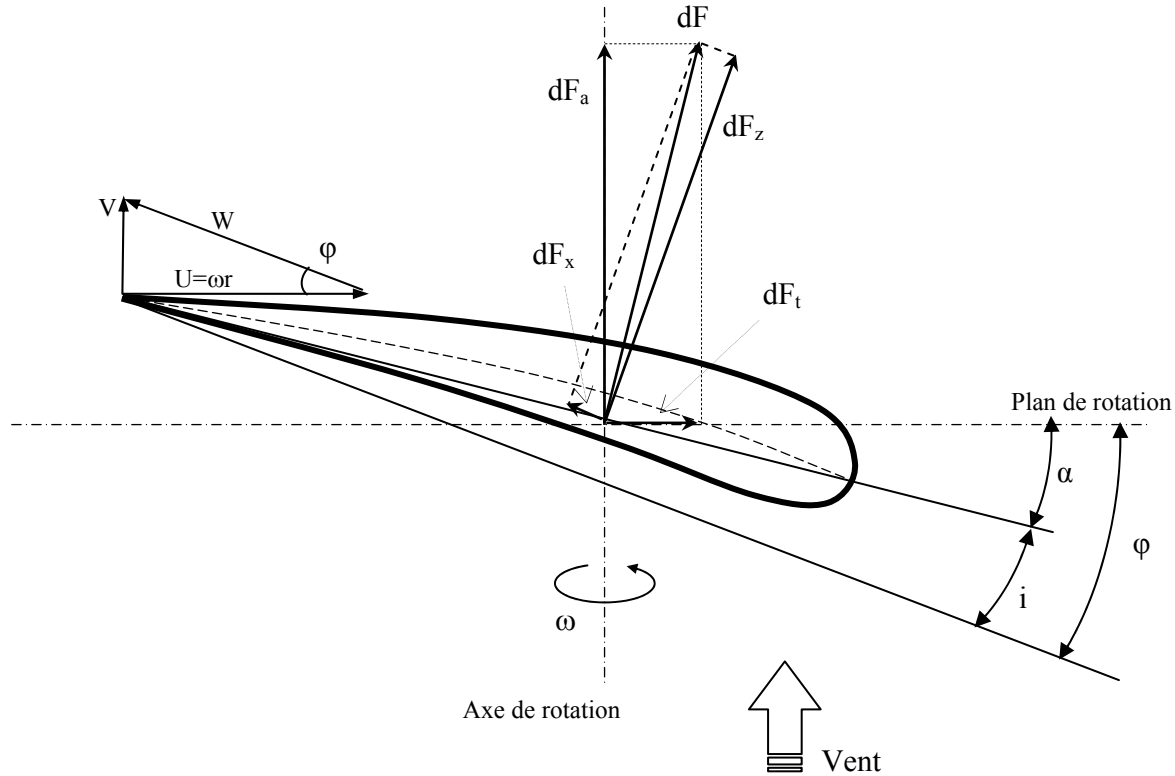


Fig 40. Efforts aérodynamiques auxquels est soumis un élément de pale

Représentons la section d'une pale située à la distance r de l'axe de rotation de l'hélice et dont l'angle de calage est α , (figure 40).

Au point de vue aérodynamique, l'air arrive sur le profil suivant la direction de la vitesse relative W , qui est la résultante de la vitesse du vent V et de la vitesse opposée à la vitesse $U=2\pi r N$ due à la rotation de l'hélice autour de son axe.

On voit que l'angle d'incidence $i = \phi - \alpha$.

Appelons dF_x et dF_z les composantes de la force aérodynamique dF qui s'exerce sur cet élément suivant la direction W et suivant la direction perpendiculaire. Ces composantes sont la traînée et la portance du profil considéré dans un vent d'intensité W .

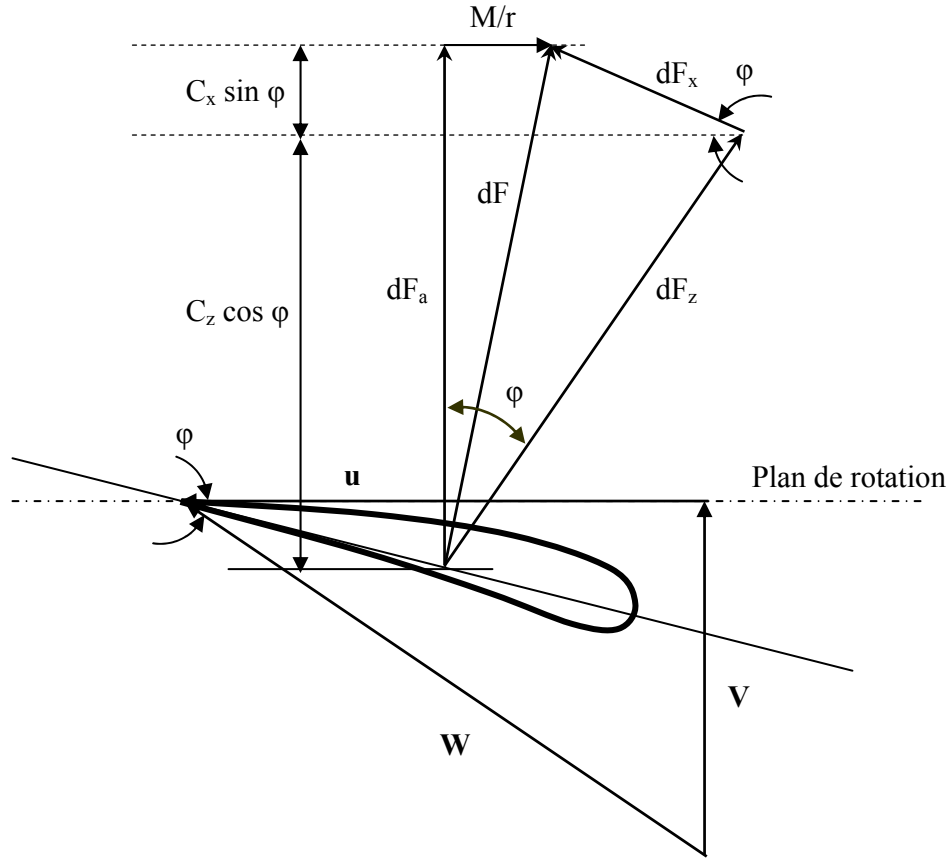


Fig 41. Relations géométriques entre les forces aérodynamiques

Evaluons la contribution de la force dF dans la poussée axiale exercée par le vent sur l'éolienne (figure 41). Dans ce but projetions dF sur la vitesse V du vent dirigée en principe selon l'axe du rotor, on obtient en appelons dF_a la projection de dF suivant cette direction :

$$dF_a = dF_z \cos \varphi + dF_x \sin \varphi \quad (IV.13)$$

Calculons le moment dM de la force dF_a par rapport à l'axe. Ce moment est égal au produit du bras de levier r par la projection de la force dF sur le plan de rotation de l'hélice.

$$dM = r(dF_z \sin \varphi - dF_x \cos \varphi) \quad (IV.14)$$

En remplaçant dans les deux formules précédentes les valeurs de dF_z et de dF_x établies dans les équations (IV.1) et (IV.2), on aboutit à :

$$dF_a = \frac{1}{2} \rho W^2 dS (C_z \cos \varphi + C_x \sin \varphi) \quad (\text{IV.15})$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho W^2 r dS (C_z \sin \varphi - C_x \cos \varphi) \quad (\text{IV.16})$$

A présent, calculons la puissance élémentaire produite par la force aérodynamique dF_a s'exerçant sur l'élément de pale de surface dS situé à la distance r .

$$dP = \Omega \cdot dM \quad (\text{IV.17})$$

Ce qui implique :

$$dP = \frac{1}{2} \rho W^2 \Omega r dS (C_z \sin \varphi - C_x \cos \varphi) \quad (\text{IV.18})$$

Les valeurs de C_x et de C_z qui interviennent dans ces relations correspondent à l'incidence i . Ces valeurs peuvent être obtenues expérimentalement par rapport au profil utilisé qui tient compte de la viscosité de l'air et des tourbillons qui se détachent des pales suite à l'envergure limitée de celles-ci.

La poussée axiale totale F_a exercée par le vent sur l'éolienne s'obtient en additionnant respectivement toutes les forces dF_a élémentaires qui agissent sur les pales. La connaissance de la poussée axiale et du couple moteur produit permet de calculer la puissance fournie par le vent à l'hélice.

$$P = \Sigma dF_a V = F_a V \quad (\text{IV.19})$$

Et la puissance recueillie sur l'arbre est :

$$P_u = M\Omega \quad (\text{IV.20})$$

Le rendement de l'hélice peut être déterminé par :

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{M\Omega}{FV} \quad (\text{IV.21})$$

3. Calcul des paramètres géométriques de l'élément de pale

Pour déterminer la largeur à donner au pales et l'angle d'attaque dans des conditions optimales de fonctionnement, nous calculerons d'abord le diamètre à donner au rotor par rapport à la puissance aérodynamique de sortie.

Pour cela, il faudrait fixer le coefficient de puissance C_p , la masse volumique de l'air ρ ainsi que la vitesse du vent incident V_0 et en utilisant l'équation suivante :

$$dP = \frac{1}{2} \rho ds V_0^3 C_p \quad (\text{IV.22})$$

On pourra calculer le diamètre du rotor :

$$R = \sqrt{\frac{2P}{C_p \rho \pi V_0^3}} \quad (\text{IV.23})$$

A partir des équations (IV.17) et (IV.22), on a :

$$C_p = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho ds V_0^3} = \frac{\omega dM}{\rho \pi r dr V_0^3} \quad (\text{IV.24})$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho W^2 r dS (C_z \sin \varphi - C_x \cos \varphi) \quad (\text{IV.25})$$

En remplaçant dM et W obtenue dans (IV.10) dans (IV.25), on obtient :

$$C_p = \frac{1}{2} \frac{\rho V_0^2 \left[(1-a)^2 + (1+a')^2 \lambda^2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] r B c dr (C_z \sin \varphi - C_x \cos \varphi)}{2 \rho \pi r dr V_0^3} \quad (\text{IV.26})$$

Après simplification, on trouve :

$$C_p = \frac{Bc\lambda}{2\pi R} \left[\lambda^2 \left(\frac{r}{R} \right) (1+a')^2 + (1-a)^2 \right] (C_z \sin \varphi - C_x \cos \varphi) \quad (\text{IV.27})$$

La corde du profil à la distance r de l'axe de rotation de l'hélice est égal à :

$$c = \frac{2\pi R C_p}{B\lambda \left[\lambda^2 \left(\frac{r}{R} \right) (1+a')^2 + (1-a)^2 \right] (C_z \sin \varphi - C_x \cos \varphi)} \quad (\text{IV.28})$$

L'angle d'incidence est défini par l'équation (IV.12)

$$\varphi = \arctg \frac{R}{r} \frac{(1-a)}{\lambda(1+a')}$$

3.1. La vitesse spécifique λ

Il faudrait aussi fixer la vitesse spécifique dont dépend le nombre de pales :

Tab 4. Nombre de pales pour différentes vitesses spécifiques

Vitesse spécifique λ	Nombre de pales B
1	8 à 24
2	6 à 12
3	3 à 6
4	2 à 4
≥ 5	2 à 3

Ainsi si l'on désire construire un aérogénérateur, on adoptera de préférence une éolienne rapide ayant une vitesse spécifique élevée, comprise entre 5 et 8 [20], de façon à limiter le rapport de multiplication de la vitesse de rotation pour l'entraînement de l'alternateur, l'éolienne sera donc bipale ou tripale.

Les coefficients d'interférences axiale a et tangentielle a' seront fixés à leur optimum, donc :

$$a = \frac{1}{3} \quad (\text{II.8})$$

$$a' = \frac{1}{2} \quad (\text{II.9})$$

3.2. Le coefficient de puissance

Les essais effectués au laboratoire Eiffel sur modèle réduit ont montrés que le fonctionnement des éoliennes rapides (bipales, tripales ou quadripales) était optimal pour des vitesses spécifiques $\lambda = 6$, ce qui correspond à un coefficient de puissance d'une valeur égale à 0.44 (figure 42).

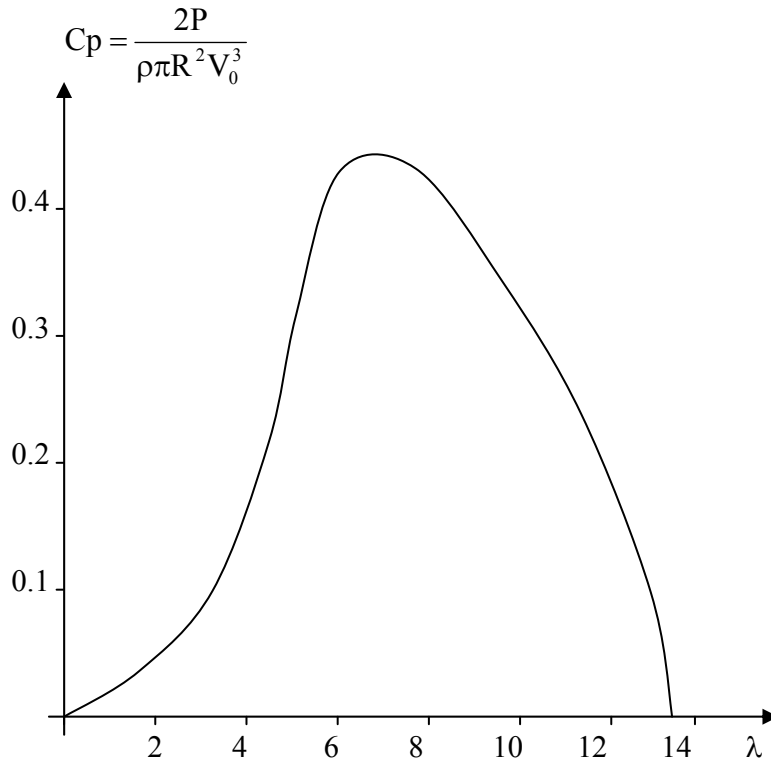


Fig 42. Coefficient de puissance en fonction de λ

Après toutes ces étapes, on pourra déterminer l'angle d'inclinaison φ pour chaque élément de pale sur toute l'envergure de celle-ci.

En utilisant les tables indiquant les valeurs des coefficients de portance et de traînée correspondant à chaque angle d'inclinaison, donc à chaque élément de pale, en choisissant un nombre de Reynolds, on pourra calculer la corde de chaque élément de pale.

Après avoir calculé la corde de chaque élément de pale, on peut déterminer le nombre de Reynolds effectif de chaque élément de pale comme suit :

$$Re = \frac{Wc}{\nu} \quad (\text{II.10})$$

Il doit être inférieur au nombre de Reynolds critique choisi pour déterminer les coefficients de portance et de traînée.

En pratique, l'éolienne modèle sera essayée en soufflerie à des vitesses de vent du même ordre de grandeur ou légèrement supérieures à celles auxquelles sera soumise l'éolienne prototype dans la réalité. Les nombres de Reynolds Re relatifs au modèle seront donc plus faibles en toutes les sections de pale. Cependant, si les valeurs de Re restent supérieures au nombre de Reynolds critique Re_c correspondant au profil utilisé, il y aura pratiquement similitude complète.

En effet, au dessus de la valeur critique Re_c , le coefficient de traînée C_x varie peu à incidence égale avec le nombre de Reynolds si bien que les valeurs de C_x pour le modèle et le prototype sont pratiquement égales pour une même incidence.

Par contre, si les essais sur modèle sont réalisés dans des conditions telles que Re soit inférieur à Re_c , le coefficient C_x deviendra plus grand à incidence égale sur le modèle que sur le prototype par suite de l'influence plus importante de la viscosité. La similitude sera moins complète.

Le nombre de Reynolds critique est d'environ 10^4 pour les profils courbes minces et de l'ordre de 10^5 à 10^6 pour les profils de genre NACA [21].

4. Organigramme schématique de calcul

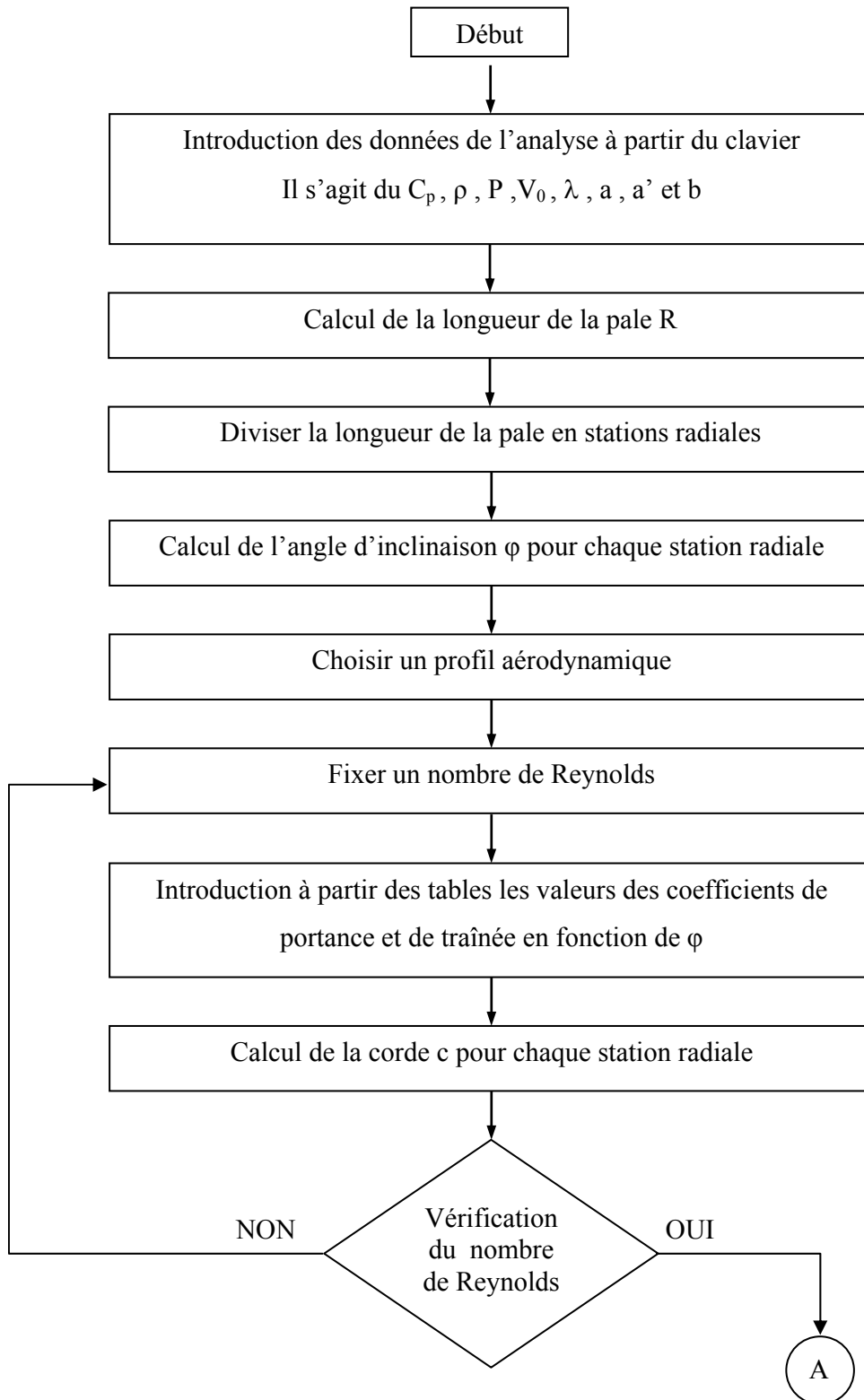
La présente méthode a été mise sous forme d'un programme de calcul. Comme on peut le voir sur l'organigramme de calcul (figure 43), les différentes étapes de calcul pour l'obtention du rayon de l'hélice de l'aérogénérateur, l'angle d'inclinaison et la corde des différentes stations de la pale en fonction de la puissance aérodynamique fixée en entrée. Les étapes du programmes sont les suivantes :

1. En première étape, on introduit les données suivantes :
 - La puissance P à avoir en sortie ;
 - Le coefficient de puissance de l'aérogénérateur C_p ;
 - La masse volumique de l'air ρ ;
 - La vitesse nominale du vent incident V_0 ;
 - La vitesse spécifique λ ;
 - Le coefficient d'interférence axiale a ;
 - Le coefficient d'interférence tangentielle a' ;

- Le nombre de pales B.

Les étapes suivantes sont :

2. Calcul du rayon de l'hélice R, qui correspond à la longueur de la pale.
3. Diviser la longueur de la pale en stations radiales.
4. Calcul de l'angle d'inclinaison ϕ pour chaque station radiale.
5. Choix d'un profil aérodynamique, par exemple NACA 4412, NACA 23024 ou bien S809.
6. Choix d'un nombre de Reynolds critique.
7. Introduction à partir des tables les valeurs des coefficients de portance et de traînée en fonction de ϕ , c'est-à-dire pour chaque station radiale.
8. Calcul de la corde de chaque station radiale, ceci correspond à la largeur de la pale.
9. Calcul du nombre de Reynolds
10. Vérification de la valeur du nombre de Reynolds calculé, si elle est supérieure à la valeur du nombre de Reynolds critique, affichage des résultats, sinon introduire les nouvelles valeurs des coefficients de portance et de traînée en fonction du nouveau Re et refaire les calculs.
11. Représentation de la variation de ϕ et c en fonction de r sous forme d'abaques.



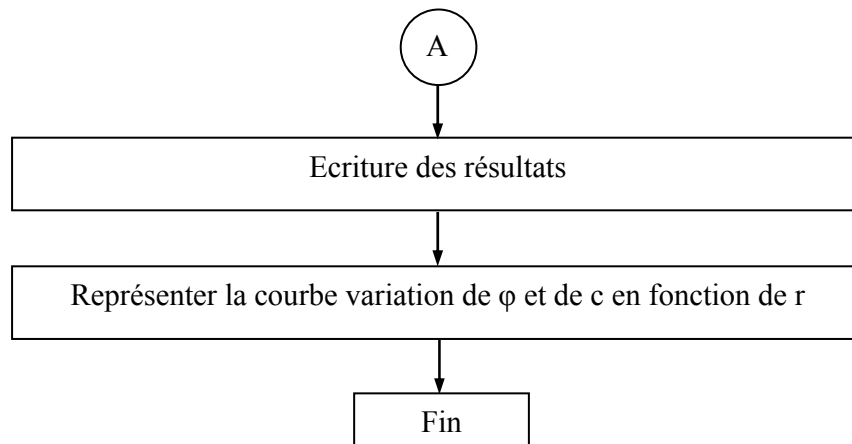


Fig 43. Organigramme schématique du programme de calcul évaluant l'angle d'attaque et la corde de l'élément de pale

Après calcul de la corde et de l'angle d'attaque de chaque élément de pale, on peut représenter le profil de chaque station, et en joignant les éléments on obtient la forme de la pale toute entière.

On pourra remarquer la variation de la largeur de la pale et un certain vrillage en fonction du diamètre de celle-ci.

Afin de réaliser cet objectif, on a opté pour l'environnement MATLAB, Version 6.5 sous la plate-forme Windows, qui est orienté vers les calculs scientifiques puissants, de même qu'il génère des résultats sous différentes formes (numériques, graphiques, histogrammes, etc..).

Aussi, il permet la représentation du profil de chaque élément de pale en introduisant les coordonnées de celui-ci.

Chapitre V

Résultats et discussions

1. Exemple de calcul

Dans tous les exemples de calcul qu'on présentera dans ce qui suit, il sera question d'un aérogénérateur tripale avec les caractéristiques suivantes :

Un coefficient de puissance : $C_p = 0.44$;

La masse volumique de l'air : $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$;

La viscosité cinématique de l'air à 20°C : $\nu = 1.51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;

La vitesse du vent $V = 10 \text{ m/s}$;

Une puissance nominale $P = 20 \text{ kW}$;

La vitesse spécifique $\lambda = 6$;

Coefficient d'interférence axiale $a = 1/3$;

Coefficient d'interférence tangentielle $a' = 1/2$;

L'angle de calage $\alpha = 0$.

Les résultats de l'exécution du programme de calcul, en utilisant différents types de profil comme modèle, sont les suivants :

1.1. Profil NACA 4412 :

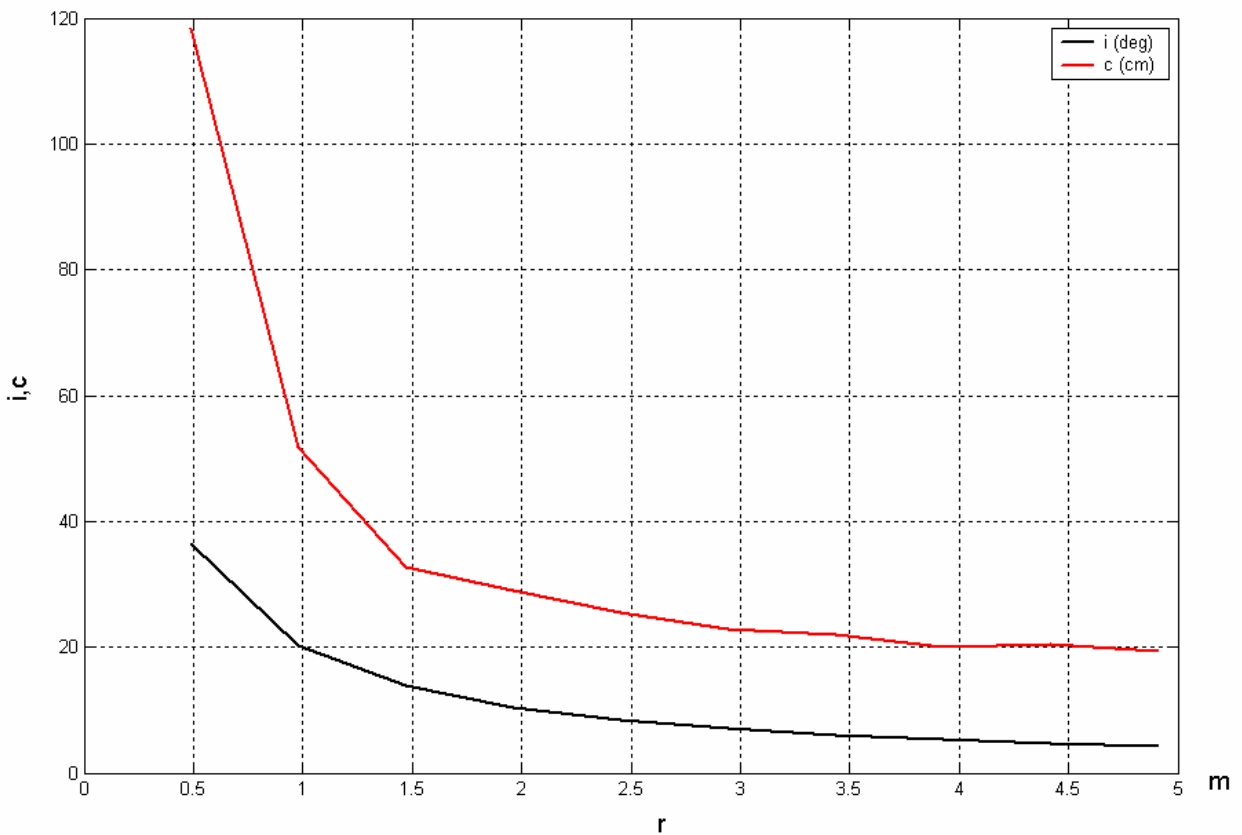


Fig 44. Variation de l'angle d'incidence et de la corde en fonction de r pour un profil NACA 4412

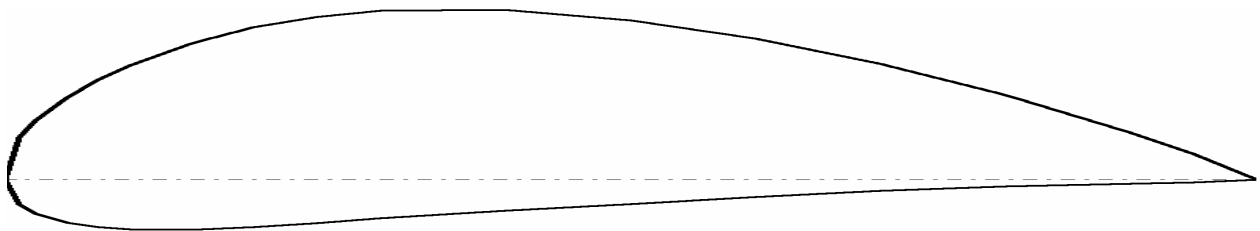


Fig 45. Profil de pale d'une NACA 4412

1.2. Profil NACA 32024

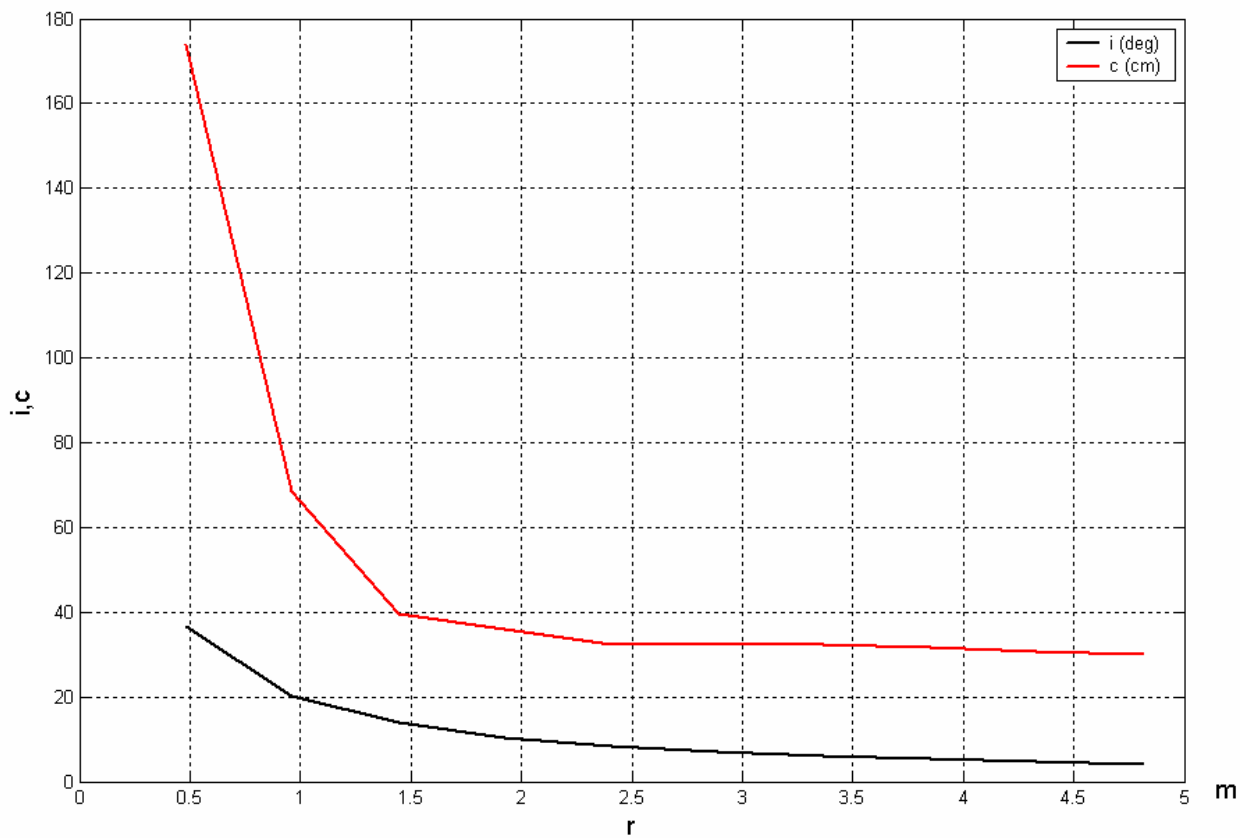


Fig 46. Variation de l'angle d'incidence et de la corde en fonction de r pour un profil NACA 23024

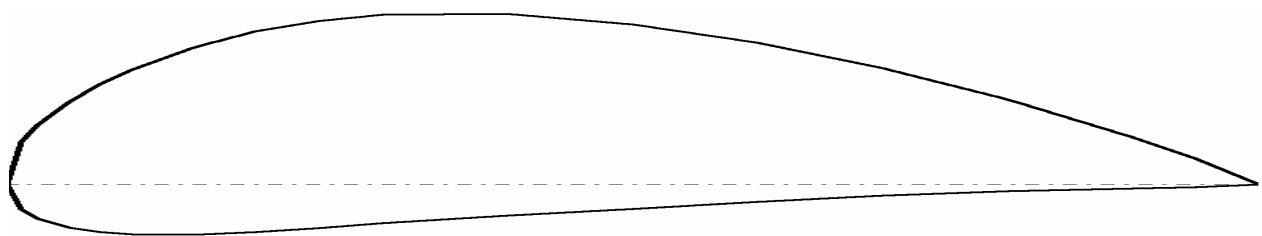


Fig 47. Profil de pale d'une NACA 23024

1.3. Profil S809

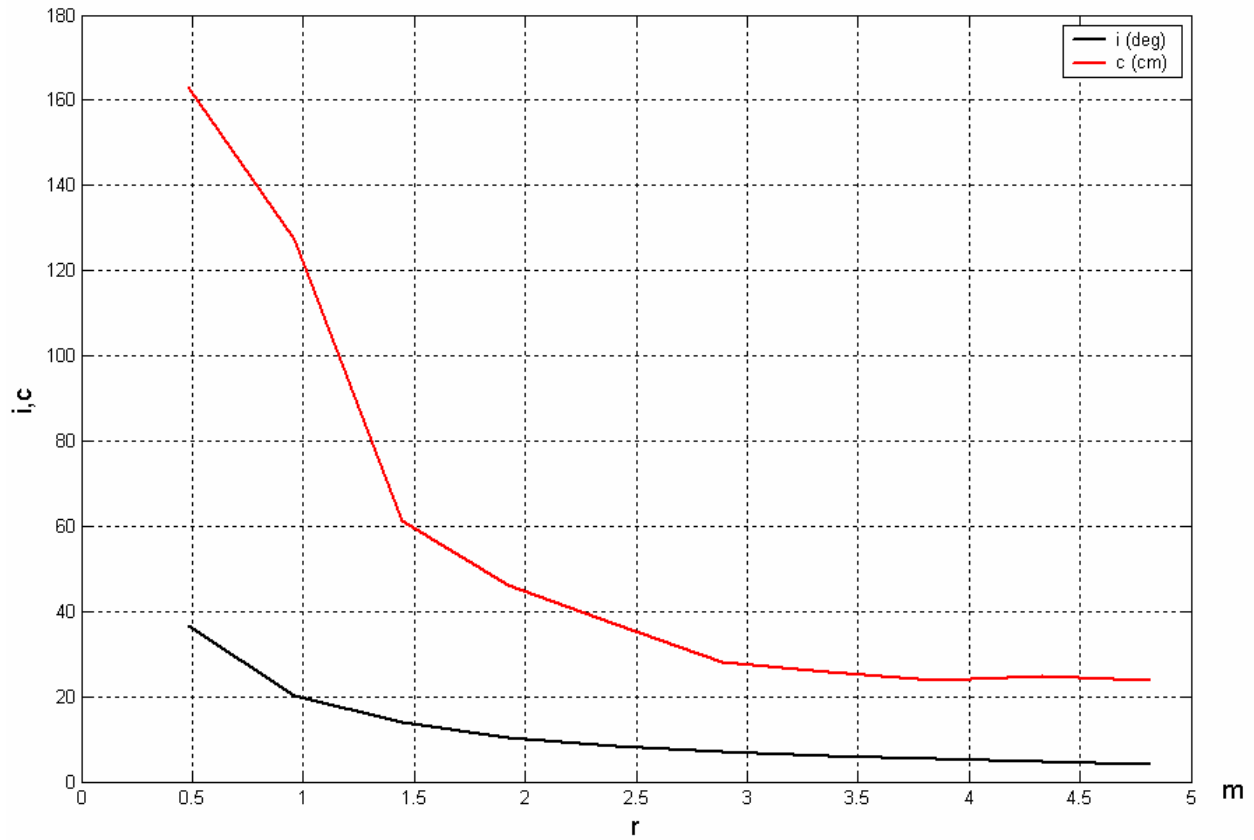


Fig 48. Variation de l'angle d'incidence et de la corde en fonction de r pour un profil S809

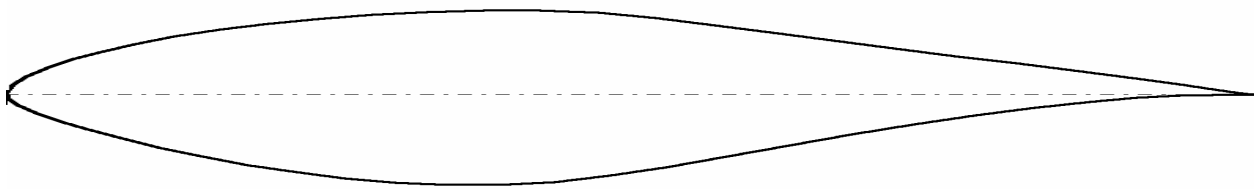


Fig 49. Profil de pale d'une S809

Remarque

On remarque que la corde et l'angle d'incidence diminuent en s'éloignant de l'axe de rotation du rotor, cela est valable pour les trois profils NACA 4412, NACA 32024 et S 809.

On remarque aussi que pour une même puissance de sortie, une même vitesse de vent et un même λ , la pale dont le profil est le NACA 4412 est plus mince que les pales des deux autres profils, donc le profil NACA 4412 est le plus performant des trois profils.

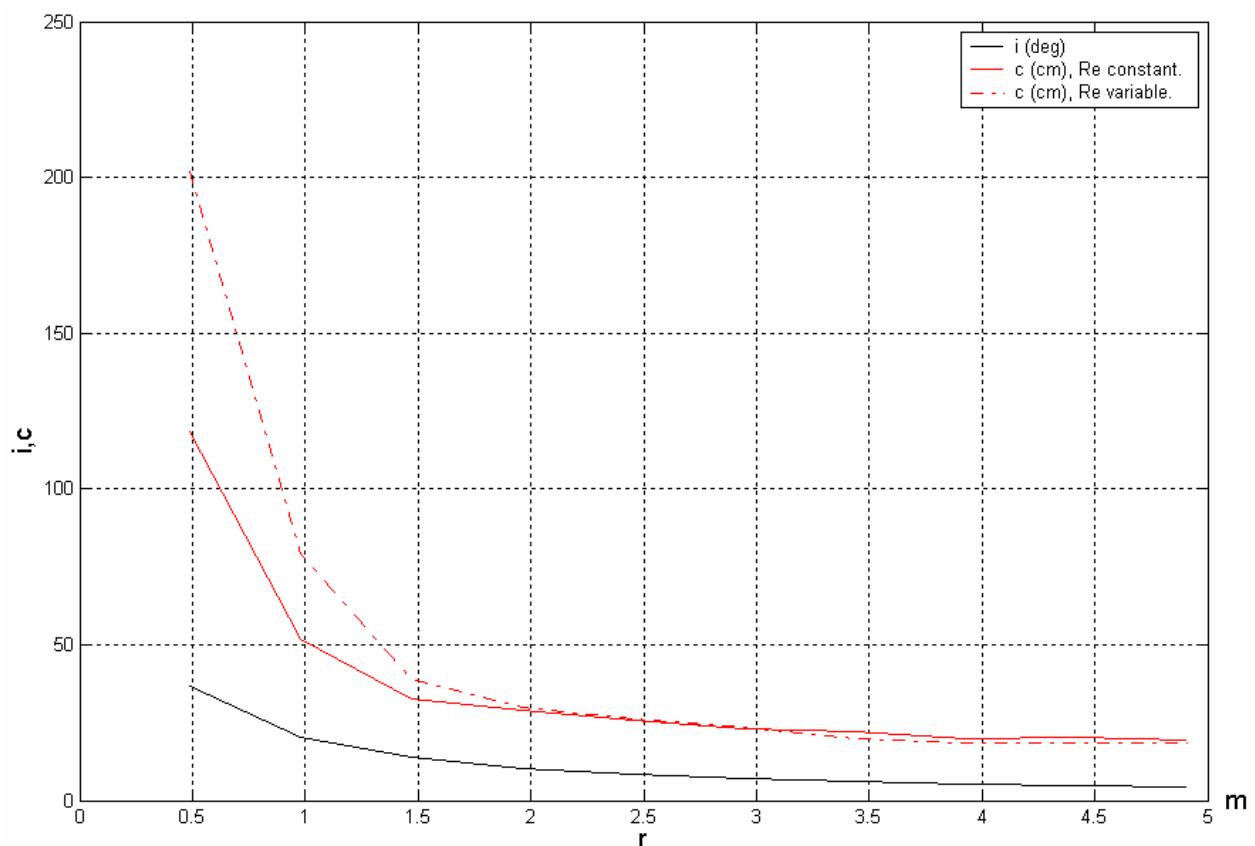
1.4. Influence de la variation du nombre de Reynolds

Fig 50. Variation de la corde et de l'angle d'attaque en fonction de r pour différentes valeurs du nombre de Reynolds pour un profil du type NACA 4412.

Pour les envergures importantes, la valeur nombre de Reynolds influe peu sur la précision de la corde de l'élément de pale, il faut juste qu'elle soit supérieure à la valeur du nombre de Reynolds critique, cette condition était respectée lors du calcul avec un nombre de Reynolds constant.

La différence entre les courbes de c qu'on remarque au petites envergures est du à la diminution du coefficient de portance avec l'augmentation de l'angle d'attaque (Annexe IV), alors que cette diminution était négligée lors du calcul en utilisant un nombre de Reynolds fixe.

1.5. Influence du nombre de pales

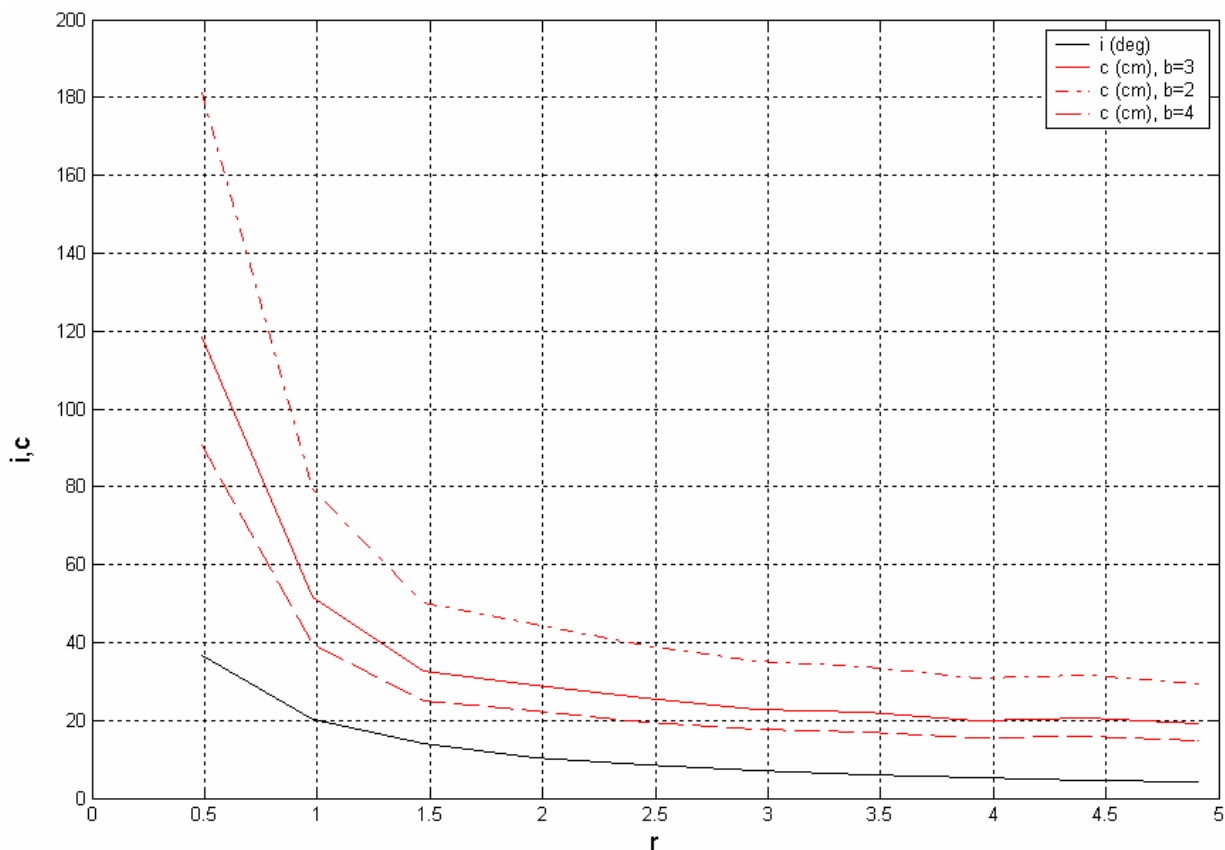


Fig 51. Variation de la corde et de l'angle d'attaque en fonction de r pour différents nombre de pales appliquée un profil du type NACA 4412.

On remarque que la corde à une largeur plus importante en diminuant le nombre de pales. On remarque aussi que l'angle de vrillage est infecté par cette variation.

1.6. Influence de la puissance de sortie

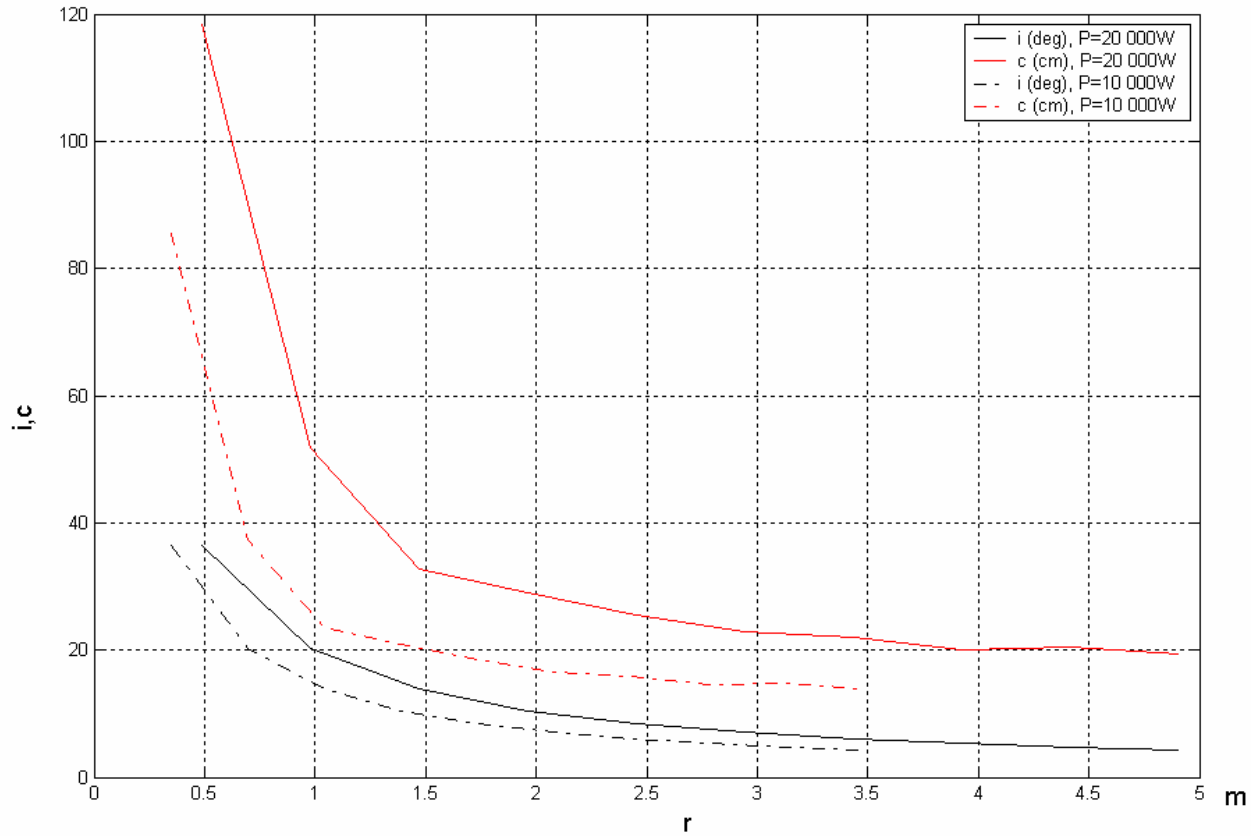


Fig 52. Variation de la corde et de l'angle d'attaque en fonction de r pour des puissance aérodynamiques de sorties différentes appliquée un profil du type NACA 4412.

On remarque que l'angle d'attaque et la corde sont proportionnels à la puissance de sortie.

1.7. Influence de la vitesse du vent

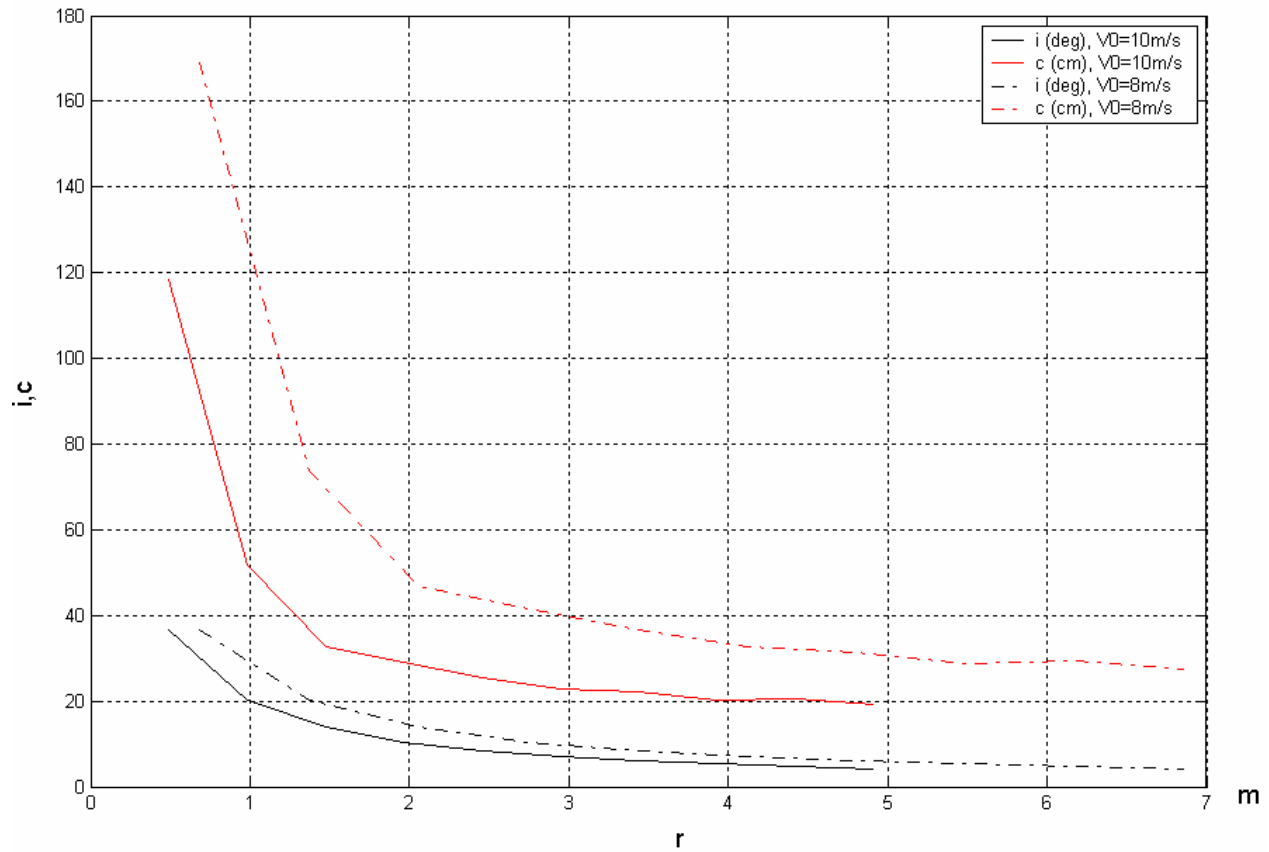


Fig 53. Variation de la corde et de l'angle d'attaque en fonction de r pour des vitesses de vent différentes appliquée un profil du type NACA 4412.

On remarque que pour une même puissance exigée en sortie, que la corde et l'angle d'attaque doivent augmenter avec la diminution la vitesse du vent.

2. Conclusion

D'après modèles de profils de pale qu'on a pris comme exemple de calcul pour déterminer les dimensions des rotors éoliens à axe horizontal, nous avons remarqué que les caractéristiques du profil NACA 4412 le rendent très bien adapté, c'est-à-dire qu'il possède une forme aérodynamique adéquate pour une utilisation dans un projet de construction d'aérogénérateurs.

Comme on peut le voir et comparer dans l'annexe (VI), le coefficient de portance du profil NACA 4412 est plus important que les profils NACA 23024 et S809 à angle de portance et à un nombre de Reynolds égaux, on peut aussi constater que le coefficient de traînée est plus faible pour le profil NACA 4412 en comparaison avec les autres profils.

Conclusion générale

La présente étude a permis de comparer entre les différents profils de pale utilisés habituellement dans la construction des d'aéromoteurs à axe horizontal destinés à la production de l'énergie électrique qui sont le profil NACA 4412, NACA 23024 et S809.

Le profil le mieux adapté pour être utilisé dans un projet d'aérogénérateurs est bien le NACA 4412, dont on a vu le comportement de l'hélice, doté de pale dont le profil est similaire au NACA 4412, face aux variations de la vitesse du vent, de la puissance de sortie et du nombre de pales, on a apprécié également l'influence du nombre de Reynolds sur la précision des résultats.

Le programme de calcul génère d'assez bons résultats et il est d'une utilisation simple. L'utilisateur doit savoir comment introduire les données d'entrée et les caractéristiques aérodynamiques (C_z et C_x) du profil choisi tout en respectant la variation de la valeur du nombre de Reynolds pour acquérir plus de précision.

Le programme peut être utilisé lors des premières étapes de toute conception d'aéromoteurs à axe horizontal. En effet, il peut nous donner une idée d'ensemble et globale des performances de la machine envisagée avec peu de moyens.

Enfin de nombreuses améliorations sont à souhaiter au présent programme de calcul, tel que :

- Prise en compte de l'envergure limitée de la pale et des interactions entre les éléments de pale. Ainsi on pourra travailler en trois dimensions et les résultats seront plus précis.
- Considération de l'élasticité de la pale. A cause des contraintes telle que la force centrifuge, la géométrie de la pale peut changer. Cette variation est minime, mais elle peut influencer considérablement sur les caractéristiques aérodynamiques de la pale.
- Limiter l'angle d'attaque à une valeur maximale de façon à ne pas faire baisser le coefficient de portance, de cette façon on pourra aussi diminuer limiter la corde donc la largeur de la pale.

Références bibliographiques

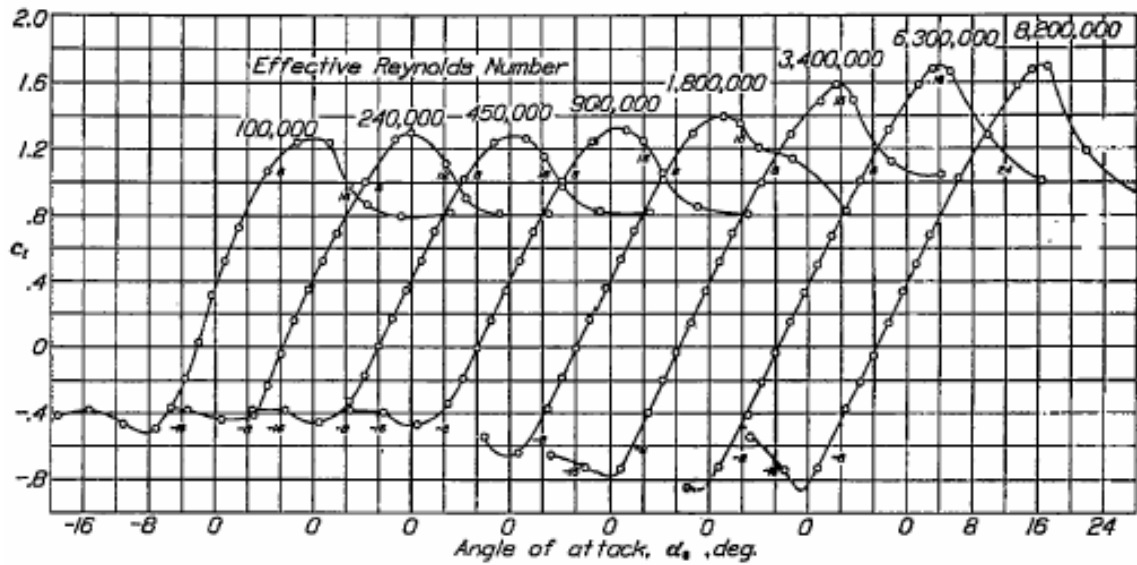
- [20] ANDERSON, M. B.; MILBORROW, D. J. and ROSS, J. N. « *Performance and Wake Measurements on a 3m Diameter Horizontal Axis Wind Turbine* ». 4th International Symposium on Wind Energy Systems, 1982.
- [19] B.T.M.-CONSULT, International Wind Energy, Danemark, 1999
- [27] C.Bouly, D.Defois, J.Faucillon, F.Billon. « *Eolienne lente de proximité conception, performances technologie et applications* ». EREA Pôle Sciences & Technologies, La Rochelle, Février 2002.
- [26] D. Afungchui, B. Kammoun, A. Chauvin. « *Development of a Wind Turbine Blade Profile Analysis Code Based on the Singularities Method* ». Rev. Energ. Ren. : 11èmes Journées Internationales de Thermique. p (81-88), 2003.
- [13] D. LE GOURIERE. « *Energie éolienne: Théorie, conception et calcul pratique des installations* ». Eyrolles, Paris, 1982.
- [3] D.MADET. « *Hydraulique et géothermie : principes physiques et modalités d'utilisation* ». EDF, 2001.
- [16] Encyclopédie des sciences industrielles. Quillet, supplément, Energie éolienne, Paris, 1998.
- [6] Encyclopédie UNIVERSALIS. Version 5.
- [15] G.CUNTY. « *Eoliennes & aérogénérateurs : Guide de l'énergie éolienne* ». Collection EDISUD, La calade, Aix-en-Provence, 1979.
- [23] IRA H.HABBOT & Albert E.VON DOENHOFF. « *Theory of wind section* ». Research engineer NASA. DOVER Publication, Inc. New York 10014, June 1958.
- [10] J.BESSEMOULKIN & R.CLAUSSE. « *Vents, nuages et tempêtes* ». Edition Maritimes et d'Outre-Mer, Paris, 1978.
- [12] J.C.DUPLETTY & MOREL. « *Gros temps sur la planète* ». Odile Jacob, Paris 1990.
- [18] Jean MARTIN. « *Energie éolienne* ». Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique.
Référence : B 8 585.
- [9] J.VERNIER. « *Les énergies renouvelables* ». P.U.F, Paris, 1997.
- [25] K.AMEUR. « *Etude numérique des performances aérodynamiques des rotors éoliens à axe horizontal* ». Centre de Développement des Energies Renouvelables, 1999.

- [2] M.H.DICKSON & M.FANELLI. « *Geothermal energy* ». UNESCO Engineering Series, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [21] MILEY, S. J. « *A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications* », Report DE82-021712, U.S. Dept Energy, 1982.
- [24] M.M. HAND, D.A. SIMMS, L.J. FINGERSH, D.W. JAGER, J.R. COTRELL. « *Unsteady Aerodynamics Experimental Phase V: test Configuration and Available Data Campaigns* ». National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-500-29491, August 2001.
- [14] P.LE CHAPPELLIER. « *Le vent, les éoliennes et l'habitat* ». Eyrolles, Paris, 1981.
- [7] **Directeur de publication** :Maïouf BELHAMEL, **Responsable de rédaction** :M'RAOUI Abdelhamid, **Comité de rédaction** : AZIZA Majda Amina, RIHANI Rachida, BENNOUNA Malika, BENHAMOU Amina, **Secrétariat** :CERBAH Doria. « *Bulletin des énergies renouvelables* ».ISSN 1112-3850. Dépôt légal 2062-2002.
- [11] R.CHABOUD. « *La météo, questions de temps* ». Nathan, Paris, 1993.
- [22] Robert M. PINKERTON. «*The variation with Reynolds number of pressure distribution over an airfoil section* ». National Advisory Committee for Aeronautics, Report No.613, 1938.
- [17] THEMA Encyclopédie Larousse, Sciences et techniques, Energie du vent et de la mer, 1999.
- [1] T.JIANDONG et al. « *Mini hydropower* ». UNESCO Engineering Series, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [5] WORLD ENERGY COUNCIL. « *New renewable energy resources, A guide to the future* ». Kogan page, Londres, 1994.
- [8] www.mem-algeria.org. Ministère de l'Energie et des Mines.
- [4] « *Yahoo encyclopédie* ».

Annexes

Annexe I

Variation du coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque pour différentes valeurs du nombre de Reynolds pour un profil NACA 4412 [22]:



Annexe II

Variation du coefficient de portance avec l'angle de calage pour différentes valeurs du nombre de Reynolds pour un profil NACA 4412 [21] :

$\alpha(^{\circ})$	Re = 42,000	Re = 83,000	Re = 160,000	Re = 330,000	Re = 640,000
-3.0	-0.03	0.10	0.13	0.07	0.10
-2.0	0.08	0.21	0.24	0.17	0.20
-1.0	0.19	0.32	0.34	0.27	0.30
0.0	0.30	0.42	0.43	0.37	0.41
1.0	0.40	0.53	0.52	0.47	0.51
2.0	0.50	0.63	0.61	0.56	0.60
3.0	0.59	0.72	0.70	0.65	0.69
4.0	0.67	0.81	0.77	0.74	0.77
5.0	0.74	0.89	0.85	0.82	0.85
6.0	0.80	0.95	0.91	0.90	0.92
7.0	0.86	1.02	0.98	0.98	0.99
8.0	0.91	1.07	1.04	1.05	1.05
9.0	0.96	1.12	1.09	1.11	1.11
10.0	0.99	1.16	1.13	1.17	1.17
11.0	1.02	1.18	1.17	1.22	1.23
12.0	1.03	1.20	1.19	1.26	1.29

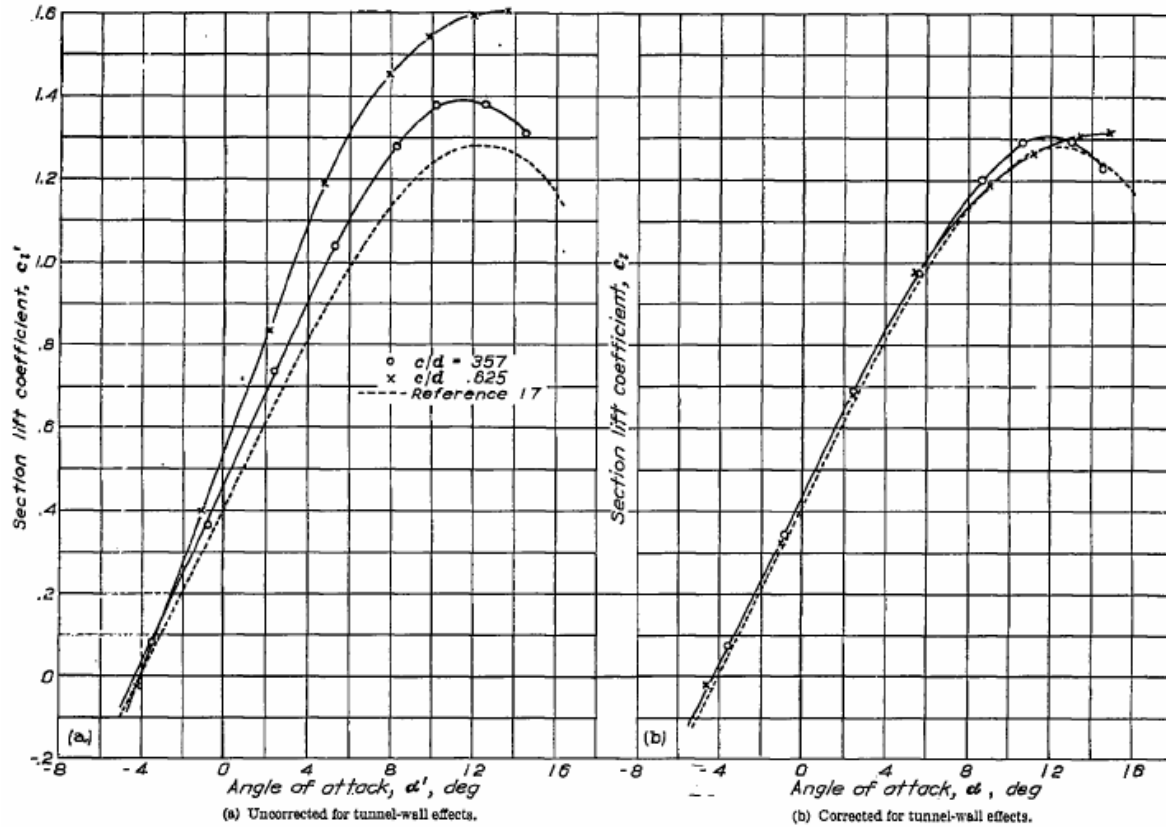
Annexe III

Variation du coefficient de traînée avec l'angle de calage pour différentes valeurs du nombre de Reynolds pour un profil NACA 4412 [21]:

$\alpha(^{\circ})$	Re = 42,000	Re = 83,000	Re = 160,000	Re = 330,000	Re = 640,000
-3.0	0.0353	0.0327	0.0159	0.0140	0.0120
-2.0	0.0352	0.0291	0.0150	0.0136	0.0117
-1.0	0.0345	0.0251	0.0147	0.0131	0.0117
0.0	0.0334	0.0233	0.0145	0.0126	0.0119
1.0	0.0325	0.0229	0.0144	0.0122	0.0123
2.0	0.0316	0.0230	0.0144	0.0120	0.0127
3.0	0.0308	0.0236	0.0144	0.0120	0.0131
4.0	0.0305	0.0245	0.0146	0.0123	0.0137
5.0	0.0307	0.0259	0.0151	0.0130	0.0144
6.0	0.0315	0.0279	0.0161	0.0141	0.0152
7.0	0.0331	0.0308	0.0176	0.0157	0.0163
8.0	0.0356	0.0346	0.0199	0.0182	0.0177
9.0	0.0387	0.0398	0.0235	0.0219	0.0198
10.0	0.0470	0.0470	0.0288	0.0277	0.0231
11.0	<u>0.0568</u>	0.0568	0.0370	0.0373	0.0284
12.0	<u>0.0704</u>	0.0704	0.0504	0.0543	0.0369

Annexe IV

Variation du coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque pour le profil NACA 4412 :



c : Corde du profil de pale.

d : Diamètre du tunnel de la soufflerie.

La courbe en pointiller est référencée au document [22].

Annexe V

Coordonnées du profil NACA 4412 dans un système d'axes orthonormés X-Y [21] :

Surface supérieure		Surface inférieure	
Station	Coordonnée	Station	Coordonnée
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.01250	0.02440	0.01250	-0.01430
0.02500	0.03390	0.02500	-0.01950
0.05000	0.04730	0.05000	-0.02490
0.07500	0.05760	0.07500	-0.02740
0.10000	0.06590	0.10000	-0.02860
0.15000	0.07890	0.15000	-0.02880
0.20000	0.08800	0.20000	-0.02740
0.25000	0.09410	0.25000	-0.02500
0.30000	0.09760	0.30000	-0.02230
0.40000	0.09800	0.40000	-0.01800
0.50000	0.09190	0.50000	-0.01400
0.60000	0.08140	0.60000	-0.01000
0.70000	0.06690	0.70000	-0.00650
0.80000	0.04890	0.80000	-0.00390
0.90000	0.02710	0.90000	-0.00220
0.95000	0.01470	0.95000	-0.00160
1.00000	0.00000	1.00000	-0.00000

Coordonnées du profil NACA 23024 dans un système d'axes orthonormés X-Y [23]:

Surface supérieure		Surface inférieure	
Station X	Coordonnée Y	Station X	Coordonnée Y
0.000	0.000	0.000	0.000
0.277	4.017	2.223	-3.303
1.331	5.764	3.669	-4.432
3.853	8.172	6.147	-5.862
6.601	9.844	8.399	-6.860
9.432	11.049	10.577	-7.647
15.001	12.528	14.999	-8.852
20.253	13.237	19.747	-9.703
25.262	13.535	24.738	-10.223
30.265	13.546	29.735	-10.454
40.256	12.928	39.744	-10.278
50.235	11.690	49.766	-9.482
60.202	10.008	59.798	-8.242
70.162	7.988	69.838	-6.664
80.116	5.687	79.884	-4.803
90.064	3.115	89.936	-2.673
95.036	1.724	94.964	-1.504
100	---	100	0.0

Coordonnées du profil S809 dans un système d'axes orthonormés X-Y [24] :

Surface supérieure		Surface inférieure	
Station X/c	Coordonnée Y/c	Station X/c	Coordonnée Y/c
0.00037	0.00275	0.00140	-0.00498
0.00575	0.01166	0.00933	-0.01272
0.01626	0.02133	0.02321	-0.02162
0.03158	0.03136	0.04223	-0.03144
0.05147	0.04143	0.06579	-0.04199
0.07568	0.05132	0.09325	-0.05301
0.10390	0.06082	0.12397	-0.06408
0.13358	0.06972	0.15752	-0.07467
0.17103	0.07786	0.19362	-0.08447
0.20920	0.08505	0.23175	-0.09326
0.24987	0.09113	0.27129	-0.10060
0.29259	0.09594	0.31188	-0.10589
0.33689	0.09933	0.35328	-0.10866
0.38223	0.10109	0.39541	-0.10842
0.42809	0.10101	0.43832	-0.10484
0.47384	0.09843	0.48234	-0.09756
0.52005	0.09237	0.52837	-0.08697
0.56801	0.08356	0.57663	-0.07442
0.61747	0.07379	0.62649	-0.06112
0.66718	0.06403	0.67710	-0.04792
0.71606	0.05462	0.72752	-0.03558
0.76314	0.04578	0.77668	-0.02466
0.80756	0.03761	0.82348	-0.01559
0.84856	0.03017	0.86677	-0.00859
0.88537	0.02335	0.90545	-0.00370
0.91763	0.01694	0.93852	-0.00075
0.94532	0.01101	0.96509	-0.00054

0.96799	0.00600	0.98446	-0.00065
0.98528	0.00245	0.99612	-0.00024
0.99623	0.00054	1.00000	-0.00000
1.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Annexe VI

Coefficient de portance et de traînée en fonction de l'angle d'attaque pour un profil NACA 4412 :

Abaques représentant la variation du coefficient de portance et de traînée en fonction de l'angle d'attaque pour le profil NACA 32024 :

Coefficients de portance et de traînée en fonction de l'angle d'attaque pour un profil S 809 :
Re = 500 000 obtenus par l'Université du Colorado