



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Département Mines



Mémoire de fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Mines

CONCEPTION ET REALISATION D'UN MINI-AEROGENERATEUR



Présenté par :

ZARAMPIRENENA Ratolojanahary

RAMAROMANANA Itovimirantosaina Navalonitrimozafy

Année universitaire : 2007 – 2008



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
Département Mines



Mémoire de fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur des Mines

CONCEPTION ET REALISATION D'UN MINI-AEROGENERATEUR



Présenté par :

ZARAMPIRENENA Ratolojanahary

RAMAROMANANA Itovimirantosaina Navalonitrimozafy

*Président de Jury : Monsieur **RASOLOMANANA Eddy***

*Rapporteur : Monsieur **RANDRIANJA Roger***

*Encadreur : Madame **ARISOA RIVAH Cathy***

Examineurs :

- *Monsieur **RANAIVOSON Léon Félix***
- *Monsieur **FABIEN Remi Roger***
- *Monsieur **DAMY JOACHIN Clotaire***
- *Monsieur **RAZAFINDRAKOTO Boni***

Date de Soutenance : 11 Mars 2009

Année universitaire : 2007 – 2008

REMERCIEMENTS

Avant tout, on ne saurait taire nos sentiments dans la mesure où la réussite de ce mémoire est le fruit d'une synergie de tout un monde de personnes de bonne volonté.

Cet ouvrage a pu être réalisé grâce à la Bénédiction et à la Bienveillance de notre Seigneur Dieu, pour qui nos louanges ne cesseront.

Nos vifs remerciements s'adressent à Monsieur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (E.S.P.A), qui nous a autorisé à présenter cette soutenance.

Nos reconnaissances vont à l'endroit de Monsieur RANDRIANJA Roger Chef de Département Mines et Enseignant Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique qui a accepté de nous diriger durant la réalisation de ce mémoire et pour tous les conseils et les temps précieux qu'il a consacrés, malgré sa lourde responsabilité.

Nous adressons nos vifs remerciements à Madame ARISOA RIVAH Kathy, notre encadreur professionnel, Enseignante Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique.

Nos remerciements et reconnaissances vont également à Monsieur RASOLOMANANA Eddy Enseignant Chercheur à l'E.S.P.A, d'avoir accepté de présider cette soutenance, ainsi qu'à tous les membres du jury qui ont pris de leur temps pour ce mémoire :

◆ *Monsieur RANAIVOSON Léon Félix, Enseignant Chercheur à l'E.S.P.A,*

◆ *Monsieur FABIEN Rémi Roger, Enseignant Chercheur à l'E.S.P.A.*

◆ *Monsieur DAMY Joachin Clotaire, Enseignant Chercheur à l'E.S.P.A.*

◆ *Monsieur RAZAFINDRAKOTO Boni, Enseignant Chercheur à l'E.S.P.A.*

On saurait oublier tous nos enseignants à l'E.S.P.A., qui nous ont instruit tout au long de ces cinq années d'études.

Enfin, nous avons une pensée noble et pleine de gratitude à l'endroit de nos chers parents, nos frères, nos sœurs et tous les membres de la famille,

Nos remerciements également adressés aux collègues de la filière Mines-Promotion 2008 et à tous les amis et camarades au Campus Vontovorona.

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire, Nous adressons nos remerciements les plus respectueux.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	- 1 -
LISTE DES TABLEAUX	- 2 -
LISTE DES FIGURES	- 3 -
LISTE DES ANNEXES	- 4 -
LISTE DES NOTATIONS	- 5 -
INTRODUCTION	- 1 -
Partie I. GENERALITES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES.....	- 3 -
Chapitre 1. LE VENT	- 4 -
Chapitre 2. ENERGIE EOLIENNE	- 15 -
Chapitre 3. ETUDES THEORIQUES	- 22 -
Partie II. ETUDE DE CONCEPTION	- 44 -
Chapitre 1. CALCUL DE LA LARGEUR DE LA PALE	- 45 -
Chapitre 2. CALCUL DE LA PUISSANCE FOURNIE PAR L'EOLIENNE.....	- 49 -
Chapitre 3. VALEUR DE LA VITESSE DE ROTATION "N"	- 50 -
Chapitre 4. EVALUATION DES EFFORTS AXIAUX ET TANGENTIAUX – CALCUL DU COUPLE MOTEUR..	- 51 -
Chapitre 5. CALCUL DES PALES AU POINT DE VUE DE LA RESISTANCE DES MATERIAUX :	- 53 -
Chapitre 6. DIMENSIONNEMENT DES DIFFERENTES PIECES DE L'AEROGENERATEUR	- 60 -
Partie III. REALISATION ET EVALUATION ECONOMIQUE	- 78 -
Chapitre 1. REALISATION	- 79 -
Chapitre 2. EVALUATION ECONOMIQUE.....	- 85 -
CONCLUSION	92
BIBLIOGRAPHIE	93
ANNEXES	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Direction du vent selon la latitude.....	- 5 -
Tableau 2 : Echelle de Beaufort	- 7 -
Tableau 3: Phénomènes observés en fonction de l'intensité des vents.....	- 8 -
Tableau 4: Valeur de " α " en fonction de la nature du terrain.....	- 10 -
Tableau 5: Estimation de la disponibilité du vent sur la surface du globe.....	- 11 -
Tableau 6: Caractéristiques du profil utilisé	- 46 -
Tableau 7: La largeur de la pale	- 48 -
Tableau 8: Catégories des bois selon la qualité.....	- 54 -
Tableau 9: Les contraintes admissibles du bois	- 55 -
Tableau 10: Tableau de calcul du centre de gravité du gouvernail.....	- 71 -
Tableau 11: Devis estimatif et quantitatif du projet.....	- 86 -
Tableau 12: Estimation des différents coûts	- 87 -
Tableau 13: Calcul des FNT.....	- 89 -

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Exemple de capteur de vitesse du vent	- 6 -
Figure 2: Circulation atmosphérique générale du vent	- 12 -
Figure 3: Les éléments constituant d'une éolienne	- 16 -
Figure 4: Tube de courant d'air	- 23 -
Figure 5: Puissance récupérée en fonction du vent	- 25 -
Figure 6: Profil d'aile	- 28 -
Figure 7: Répartition des pressions sur la pale	- 30 -
Figure 8: La traînée et la portance	- 31 -
Figure 9: Variation des coefficients C_z et C_x en fonction de l'incidence i	- 32 -
Figure 10: Polaire d'Eiffel	- 33 -
Figure 11: Polaire de Lilienthal	- 35 -
Figure 12: Caractéristiques géométriques d'une pale	- 36 -
Figure 13: Les efforts aérodynamiques	- 37 -
Figure 14: Les efforts sur l'élément de pale	- 38 -
Figure 15: Efforts aérodynamiques sur un élément de la pale	- 42 -
Figure 16: Les différentes sections de la pale	- 55 -
Figure 17: La pale finie	- 56 -
Figure 18: Les pales soumises à des effets gyroscopiques	- 57 -
Figure 19: Schéma de principe du multiplicateur	- 63 -
Figure 20: Décalages de l'entraxe	- 65 -
Figure 21: L'empennage.	- 69 -
Figure 22: Position du centre de gravité du gouvernail	- 70 -
Figure 23: Forme du gouvernail	- 72 -
Figure 24: Caractéristiques de base	- 73 -
Figure 25: Nappe formée par la faisceau des courbes	- 74 -
Figure 26: Tension en fonction de courant	- 74 -
Figure 27: Caractéristiques de charge	- 75 -
Figure 28: Tension en fonction du régime	- 75 -
Figure 29: Effet de la température	- 76 -
Figure 30: Charge à faible vitesse	- 76 -
Figure 31: Vue d'ensemble	- 79 -
Figure 32: Fixation de la pale	- 80 -
Figure 33: Arbre et tube avec son porte roulement	- 81 -

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : DONNEES METEOROLOGIQUES

ANNEXE II : LES COEFFICIENTS DU PROFIL

ANNEXE III : EVALUATION DES EFFORTS AXIAUX ET TANGENTIELS – CALCUL
DU COUPLE MOTEUR

ANNEXE IV : DESSINS TECHNIQUES

LISTE DES NOTATIONS

V :	Vitesse du vent	[m/s]
λ :	Vitesse spécifique du vent (sans dimension)	
V_1 :	Vitesse du vent à l'amont	[m/s]
F_x :	Traînée	[N]
F_z :	Portance	[N]
m_p :	Masse d'une pale	[kg]
V_2 :	Vitesse résiduelle du vent à l'aval	[m/s]
S :	Surface balayée par l'hélice	[m ²]
S_1 :	Section en amont	[m ²]
S_2 :	Section en aval	[m ²]
F :	Force exercée par l'air en mouvement	[N]
P :	Puissance absorbée par l'aéromoteur	[W]
ΔE :	Puissance absorbée par l'aéromoteur	[W]
ρ :	Masse volumique de l'air	[kg/m ³]
P_{max}	Energie maximale susceptible d'être recueillie par l'aéromoteur	
i :	Angle d'incidence	[°]
α :	Angle de calage	[°]
α_0 :	Angle de calage dont la portance est nulle	[°]
l :	Largeur de la pale	[m]
C_x :	Coefficient de traînée	
C_z :	Coefficient de portance	
C_m :	Coefficient du moment	

f :	Finesse (Etude aérodynamique de l'hélice)	
Fn :	Force aérodynamique	[N]
I :	Angle que fait W avec le plan de rotation de l'hélice	[°]
N :	Fréquence de rotation de l'hélice.	[tr/min]
W :	Vitesse relative du vent	[m/s]
Pu :	Puissance recueillie sur l'arbre de l'aéromoteur	[W]
r :	Distance par rapport à l'axe de rotation	[m]
It :	Investissement total du projet	[Ariary]
FNT :	Flux net de trésorerie	[Ariary]
E :	Gain énergétique	[Kwh]
VAN :	Valeur actuelle nette	[Ariary]
TRI :	Taux de rentabilité interne	[%]
CA :	Capitale investie	[Ariary]
POT :	Temps de remboursement (Pay Out Time)	[Année]

INTRODUCTION

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable. Dès l'antiquité, les hommes ont utilisé la marine à voile pour les conquêtes et le commerce, moulin à vent pour la meunerie, l'irrigation....Cependant la complexité de la maîtrise de la force du vent a freiné le développement de cette technologie.

Actuellement, l'énergie éolienne, vue par le perfectionnement de l'aérogénérateur moderne, est devenue parmi les sources d'énergie renouvelable les plus utilisées. L'exploitation des nouvelles sources d'énergies, inépuisable, disponible et sans conséquence néfaste sur l'environnement s'avère nécessaire. L'énergie éolienne répond bien à ces critères.

Le principe de base de cette technologie consiste à transformer l'énergie du vent en énergie mécanique dans divers champs d'action comme: minoterie, station de pompage, centrale électrique.

Pour le minimum de confort d'une habitation isolée ou située en milieu rural, éclairage et appareils ménagers (radio, télévision), nous sommes amenés à faire cette étude intitulée « conception et réalisation d'un mini-aérogénérateur ». Il correspond à la demande énergétique minimale d'une famille.

L'utilisation correcte de l'énergie du vent fait appel à un choix très judicieux du site en fonction de la vitesse moyenne du vent, sa direction, sa fréquence ainsi que les obstacles environnants pouvant perturber son écoulement

Dans le but d'évaluer l'énergie contenue dans le vent, l'analyse des données relatives au vent consiste essentiellement à déterminer sa force et sa fréquence. De ce fait, on voit donc qu'une étude préalable est nécessaire pour connaître la vitesse moyenne annuelle du vent et en rendant compte de la période où l'on ne peut pas extraire la puissance du vent c'est à dire en régime vent nul. Cela implique des années d'études en fonction du site choisi.

Nous nous sommes limités à la consultation de quelques documents car le temps ne nous a pas permis d'investiguer plus loin.

En tant qu'ingénieurs, nous nous sommes intéressés beaucoup plus à la réalisation pratique pour acquérir plus d'expérience et pour évaluer nos capacités techniques et scientifiques, les paramètres étant réduits au strict minimum.

Partie I. GENERALITES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I. LE VENT

Le vent fut, sans doute, l'une des premières sources d'énergie utilisée par l'homme. Sur des radeaux, nos aïeux eurent l'idée de tendre des voiles de fibres et surent s'affranchir de la servitude des courants. Leurs déplacements en furent plus rapides et plus souple.

1. Définition

Le vent, d'après l'encyclopédie, c'est de l'air en mouvement. Le terme est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère ; les mouvements de direction verticale ou presque verticale sont des courants.

2. Origine

Les régions autour de l'équateur (latitude 0° à approximativement 38°) subissent une insolation plus importante que le reste des régions du globe.

L'air s'élève donc dans l'atmosphère suite à sa plus faible densité, pour atteindre une altitude d'environ 10km. Ensuite, il s'étend sur la surface du globe par un mouvement de l'équateur vers les pôles. Ce phénomène porte le nom de circulation Hadley. Cependant, du à la rotation de la planète, apparaît une composante transversal au mouvement vers les pôles des vents. C'est la force de Coriolis. Les vents centrés autour d'une dépression, dans l'hémisphère Nord, auront ainsi toujours un mouvement dans le sens trigonométrique. En effet, la force de Coriolis empêche les vents d'aller beaucoup plus loin. Il en résulte donc que ces régions sont soumises à des hautes pressions (les vents refroidis commencent à redescendre).

3. Caractéristiques

3.1 *Direction du vent*

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la Terre. L'augmentation de la vitesse du vent au fur et à mesure que l'on s'élève au dessus du sol est un problème bien connu.

Les vents s'organiseront ainsi en deux parties : la première, à haute altitude, de l'équateur vers les pôles (vents géostrophiques). La seconde, dans le sens inverse mais au niveau du sol (vents de surface). La force de Coriolis se fera toujours sentir. Sans la force de Coriolis, les échanges thermiques Nord-sud serait directs et les vents seront violents. L'influence de la force de Coriolis engendre de perturbation dans l'écoulement des masses d'air sur l'axe Nord-Sud. Le cisaillement des vents régule les échanges de température.

Les vents de surface auront une direction préférentielle selon la latitude :

Tableau 1: Direction du vent selon la latitude

Latitude	90° - 60°N	60° - 30°N	30° - 0°N	0° - 30°S	30° - 60°S	60° - 90°S
Direction	(NE)	(SW)	(NE)	(SE)	(NW)	(SE)

La direction du vent est généralement exprimée en degré et indiquée par la dizaine de degré la plus proche à l'aide de l'échelle 01-36.

3.2 Vitesse du vent

Mesures anémométriques

Le vent est une grandeur vectorielle tridimensionnelle. On peut représenter ses trois composantes dans les différents systèmes de repères (cartésien, cylindrique, sphérique). Sa vitesse peut être exprimée en (m/s), en (Km/h) ou en nœud (kt). (1m/s = 3,6 Km/h = 1,85 kt). Pour ce faire, les anémomètres les plus fréquemment utilisés pour mesurer les composantes horizontales du vent sont les anémomètres à moulinet (coupelle ou hélice et les girouettes). Mais pour mesurer à la fois la composante horizontale et verticale du vent, on utilise l'anémomètre à trois hélices, appelés anémomètres tridimensionnels ou bien les anémogirouettes à deux directions.

Voici quelques exemples de capteur de vitesse du vent :

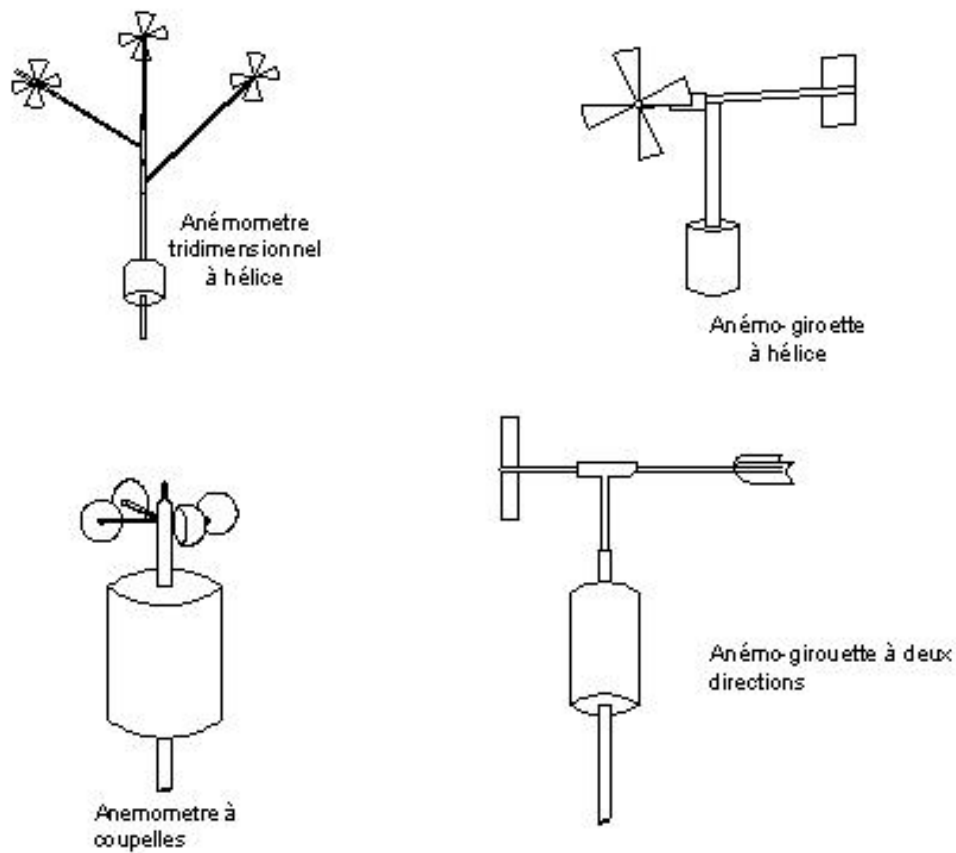


Figure 1: Exemple de capteur de vitesse du vent

Echelle de Beaufort

Pour indiquer la vitesse du vent, l'échelle de Beaufort est utilisée par les marins et les météorologistes. Elle fut inventée en 1805 par l'hydrographe Irlandais **Francis Beaufort**. Une graduation a été établie, qui divise les vents en fonction de leur vitesse en 17 catégories qui est illustrée par le tableau suivant :

Tableau 2 : Echelle de Beaufort

Degrés Beaufort	Vitesse du vent			Description générale	Pression sur surface plane en daN/m2
	Nœuds	m/s	Km/h		
0	1	0/0.4	<1	Calme	
1	1/3	0.5/1.5	1/5	Très légère brise	0.13 (1m/s)
2	4/6	1.6/3.4	6/11	légère brise	0.8 (2.5m/s)
3	7/10	3.5/5.5	12/19	Petite brise	3.2 (5m/s)
4	11/16	5.5/8	20/28	jolie brise	6.4 (7m/s)
5	17/21	8.1/10.9	29/38	Bonne brise	13 (10m/s)
6	22/27	11.4/13.9	39/49	Vent frais	22 (13m/s)
7	28/33	14.1/16.9	50/61	Grand frais	33 (16m/s)
8	34/40	17.4/20.4	62/74	Coup de vent	52 (20m/s)
9	41/47	20.5/23.9	75/88	Fort coup de vent	69 (23m/s)
10	48/55	24.4/28	89/102	Tempête	95(27m/s)
11	56/63	28.4/32.5	103/117	Violente tempête	117 (30m/s)
12	64/71	32.6/35.9	118/133	Ouragan	160 (35m/s)
13	72/80	36.9/40.4	134/149	-	208 (40m/s)
14	81/89	40.1/45.4	150/166	-	265 (45m/s)
15	90/99	45.1/50	167/183	-	325 (50m/s)
16	100/108	50.1/54	184/201	-	365 (54m/s)
17	109/118	54.1/60	202/220	cyclone	470 (60m/s)

La dernière colonne indique la pression moyenne en daN/m^2 sur des surfaces planes placées perpendiculairement au vent, calculée à partir de la formule de la pression $p=0,13V^2$, V étant exprimée en m/s.

Les vitesses maximales les plus élevées se rencontrent dans les cyclones tropicaux (des vitesses de 150 à 200 Km/h ne sont pas exceptionnelles) et aux environs de 45° de latitude Sud.

Le tableau suivant décrit les phénomènes observables en fonction de l'intensité des vents exprimée en « **degré Beaufort** ».

Tableau 3: Phénomènes observés en fonction de l'intensité des vents

Intensité du vent en degré Beaufort	Critères d'appréciation	
	En mer	A terre
0	La mer est calme	La fumée s'élève verticalement
1	Formation de rides à l'aspect d'écailles mais sans crête d'écume	Le vent incline la fumée, mais ne fait pas tourner les girouettes.
2	Vaguelettes encore courtes, mais plus prononcées. Les crêtes ont l'aspect vitreux mais ne brisent pas	Les feuilles frémissent. On sent le souffle du vent sur le visage.
3	Grandes vaguelettes. Les crêtes commencent à briser. Ecume d'aspect vitreux. Apparition de moutons épars	Les feuilles et les petites branches s'agitent en permanence.
4	Les vagues courtes s'allongent. Les moutons deviennent de plus en plus denses.	Le vent soulève la poussière et les feuilles. Les rameaux s'agitent.
5	Vagues modérées, prenant une forme plus prononcée.	Les petits arbres feuillus

	Nombreux moutons.	commencent à se balancer.
6	De grandes vagues commencent à se former. Les crêtes d'écume blanche se forment partout. Embruns	Les grades branches s'agitent. Les fils électriques vibrent. Il devient difficile de se servir d'un parapluie.
7	La mer grossit et l'écume blanche, provenant des vagues commencent à s'envoler en trainées	Les arbres bougent. Il est désagréable de marcher vent debout.
8	Vagues hautes, de plus grande longueur. Les crêtes commencent à se pulvériser en embrun. L'écume s'envole en trainées bien marquées.	Les petites branches des arbres se brisent .Il devient difficile de marcher.
9	Les vagues très hautes commencent à déferler. Denses trainées d'écume. Les embruns réduisent la visibilité	Les branches moyennes des arbres cassent.
10	Très hautes vagues déferlant violemment. Pans d'écume emportés en trainées très denses. Surface de l'eau toute dense. Visibilité très faibles	Les arbres sont déracinés et les toitures endommagées.
11 et au dessus		Ravages étendus. Toitures arrachées, etc.

La variation de la vitesse du vent avec la hauteur :

La vitesse du vent augmente au fur et à mesure que l'on s'élève au dessus du sol. La diminution de la vitesse du vent circulant à basse altitude est due à la présence des obstacles sur la direction du vent. Ces derniers modifient considérablement la forme et la répartition des intensités du flux d'air aux alentours du sujet. Les relevés météorologiques montrent que l'accroissement relatif de la vitesse avec l'altitude par rapport au sol varie d'un point à un autre.

Ainsi, ces variations peuvent être représentées par une loi de la forme :

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (1.1.1)$$

V_0 : La vitesse du vent à la hauteur H_0 (égale à 10m) ;

V : La vitesse du vent observée à la hauteur H

α : une valeur qui dépend de la nature du milieu à étudier

$(\alpha = 0,096 * \log h_0 + 0,016 (\log h_0)^2 + 0,24)$

h_0 : L'inégalité du sol.

Tableau 4: Valeur de " α " en fonction de la nature du terrain

Nature du terrain	Inégalité du sol h_0	Exposant " α "
Plat: glace, neige, mer, marécage, herbe,...	0 à 20	0,08 à 0,12
Peu accidentés (inégalité de faible amplitude) : champ et pâturage, culture,	20 à 200	0,13 à 0,16
Accidentés : bois, zones peu habitées	1000 à 1500	0,20 à 0,23
Très accidenté : ville, ...	1000 000	1,25 à 0,40

3.3 Répartition du vent sur la surface du globe

- ♦ Selon les données du "World Energy Resources Council", 27% de la surface de la planète ($107 \times 10^6 \text{ km}^2$) sont balayés par un vent d'au moins 5m/s, vitesse mesurée à 10 m de la surface du sol.
- ♦ La puissance maximale pouvant être ainsi générée est de 8MW par km^2 . Ce qui représente une puissance potentielle de $24 \times 10^{13} \text{ W}$. En pratique, 4% de cette énergie pourrait être récupérée grâce à des aérogénérateurs.
- ♦ Des études pilotes, utilisant les technologies actuelles, montrent que la puissance pouvant être générée est estimée à 0,33MW par km^2 , soit une énergie moyenne annuelle de $2 \times 10^6 \text{ Kwh}$.

Tableau 5: Estimation de la disponibilité du vent sur la surface du globe.

Région	Surface (en milliers de km.)	Portion de surface parcourue par un vent soufflant entre 3 et 7 m/s (%)	Surface bénéficiant d'un vent soufflant entre 3 et 7 m/s (en milliers de km ²)
Amérique du Nord	19 339	41%	7 876
Amérique Latine et Caraïbes	18 482	18%	3 310
Europe de l'Ouest	4 742	42%	1 968
Europe de l'Est et autres pays indépendants	23 047	29%	6 783
Moyent Orient et Afrique du Nord	8 142	32%	2 566
Afrique du Sud et Sahara	7 255	30%	2 209
Zone Pacifique	21 354	20%	4 188
Chine	9 597	11%	1 056
Asie Centrale et Asie du Sud	4 299	6%	243
Total	116 257	26%	30 199

Source : WINDELA

Circulation atmosphérique générale du vent

La circulation atmosphérique générale a été étudiée par de nombreux auteurs, en particulier par Rossby. Elle a lieu essentiellement dans la troposphère, partie inférieure de l'atmosphère qui contient les 4/5 de la masse de celle-ci et dont l'épaisseur atteint 7 km au pôle et 17km à l'équateur. Elle trouve son origine dans trois causes principales :

Le rayonnement solaire plus important à l'équateur qu'aux pôles qui est le facteur le plus important.

La rotation de la terre qui provoque une déviation des vents vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud et par effet centrifuge, une surélévation de la hauteur d'atmosphère à l'équateur.

Le mouvement des masses d'air dû aux perturbations atmosphériques.

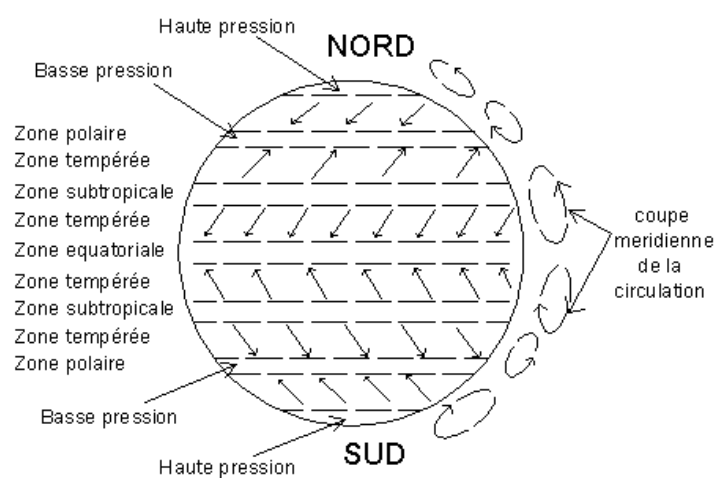


Figure 2: Circulation atmosphérique générale du vent

3.4 . Situation environnementale et climatique à Madagascar

Madagascar est situé dans la zone tropicale, c'est une île balayée par des vents : les alizées de Sud-Est et la mousson du Nord-Est. De plus, Madagascar se trouve sur le parcours des cyclones de l'océan indien.

Au Nord de l'île, pendant l'été austral, chaud et humide, le vent de mousson souffle et s'ajoute régulièrement des cyclones. Plutôt frais et sec, la région de l'Est reçoit une forte précipitation due aux alizés du Sud Est. Le climat des Hautes Terres, influencées par l'altitude, est caractérisé par la diminution des pluies et des températures et l'augmentation de l'amplitude thermique. Tandis qu'au versant

occidental, les vents sont peu abondants. Enfin, le Sud, défini par son climat semi-aride, connaît des contrastes thermiques marqués.

3.5 . Choix du site d'implantation de l'éolienne

Par suite de l'irrégularité des vents, la rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation. Tout d'abord, il faut trouver une zone dégagée, le moindre accident de relief ayant des incidences sur la régularité du vent. L'éolienne devra être éloignée de tout obstacle d'au moins dix fois la hauteur de ce dernier.

Il faudra également éviter les sommets de falaises ou de fortes pentes. En règle générale, il vaudra mieux dépasser le sommet des obstacles environnants de quelques mètres. Les turbulences créées par ces obstacles risquent, en effet, de créer sur les pales des contraintes mécaniques qui les briseraient rapidement.

Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées.

Dans le cas d'un petit aérogénérateur, il est souhaitable de l'implanter près du lieu d'utilisation, pour limiter la longueur des fils électriques. Cela restreint donc le site à une zone de quelques hectares qu'il faudra prospector afin de choisir le point le plus favorable.

Si le sol est très accidenté et qu'il n'est pas possible de placer la machine hors de cette zone, il faudra placer l'éolienne à une certaine altitude par rapport au sol (au moins 15 m) pour éviter d'une part les turbulences produites par des buissons, des roches... et pour profiter de l'augmentation de la vitesse du vent avec l'altitude.

3.6 Les sites favorables à l'éolienne à Madagascar

Les phénomènes thermiques couplés aux forts vents alizés en zone littorale entraînent la présence d'un potentiel éolien très favorable. Le vent est très important sur la pointe Nord tout comme sur l'extrême Sud du pays.

Le Nord du pays présente de très nombreux sites avec des vitesses moyennes annuelles de vent supérieures à 8m/s à 50m de hauteur par rapport au sol.

Nosy Be (la presqu'île d'Andemby) affichent des gisements éoliens très favorables, avec des sites où la vitesse moyenne est supérieure à 9m/s à 50m d'altitude.

Cap Diégo et les alentours d'Antsiranana possèdent un gisement éolien important avec une vitesse moyenne supérieure à 9m/s à 50m d'altitude

La frange côtière proche d'Ambanja présente tous des vents à vitesse supérieure à 7,5m/s à 50m d'altitude.

Le centre de Madagascar (région s'étendant du 16° à 24° de latitude Sud), la frange côtière a un gisement éolien moyen compris entre 6 et 6,5m/s à 50m d'altitude.

L'extrême Sud de Madagascar est favorablement exposé aux vents de 8 à 9m/s à 50m d'altitude.

Les environs de Taolagnaro, la zone Sud Est proche de Tsihombe, en bord de mer, ont une vitesse supérieure à 8m/s à 50m d'altitude.

Plus au Sud-Sud-ouest, les sites proches d'Itampolo, Cap Vohimena, la vitesse du vent est supérieure à 9m/s à 50m d'altitude.

De ce fait, Madagascar bénéficie d'une ressource éolienne considérable.

Chapitre 2. ENERGIE EOLIENNE

1. Historique

Dans l'Antiquité, tout le bassin méditerranéen était hérissé de mâts et des pales d'éolienne servant à pomper l'eau et assurant le ravitaillement des hommes comme des animaux, ainsi que l'irrigation des terres arables.

Mais cet usage énergétique ne pouvait se satisfaire que de contrées aux vents réguliers, bien repartis au long de l'année, quelles que soient les variations de leur axe d'écoulement, leur direction.

Aujourd'hui, on utilise le vent pour produire de l'électricité. Des turbines éoliennes transforment le mouvement, ou l'énergie cinétique en énergie mécanique qui peut être utilisée directement pour écraser du maïs ou pour faire marcher un générateur qui produit de l'électricité. Les éoliennes sont une version moderne du moulin à vent, qui est utilisé depuis des milliers d'années. Comme les moulins, les éoliennes ressemblent à des énormes roues. Aujourd'hui, l'énergie du vent est utilisée pour produire l'électricité de bien des pays dans le monde, surtout dans les endroits proches des côtes.

L'énergie éolienne est une énergie qui présente énormément d'avantages : elle est renouvelable, inépuisable, elle ne produit pas de déchets et elle est disponible un peu partout. Economiquement rentable, elle est également créatrice d'emplois.

La compréhension du fonctionnement d'une éolienne représente beaucoup de challenges. Elle comprend l'étude des paramètres suivants:

- L'énergie disponible dans un flux d'air
- Les vitesses relatives et angles du vent
- Le fonctionnement des pales vrillées
- La traînée et la portance d'un profil aérodynamique
- Effet du décrochage sur le rendement d'un générateur de vent
- Utilisation de la portance pour générer de la force

- Utilisation de pales symétriques avec des turbines à axe vertical

L'un des atouts de l'énergie éolienne est le fait que ces facteurs soient tous utilisés dans les machines, et que leur rendement soit facilement mesuré et contrôlé. Chaque manuel d'utilisation fait passer la théorie après les expériences de façon à permettre aux expériences de former un module d'énergie renouvelable.

2. Les éléments constitutants d'une éolienne

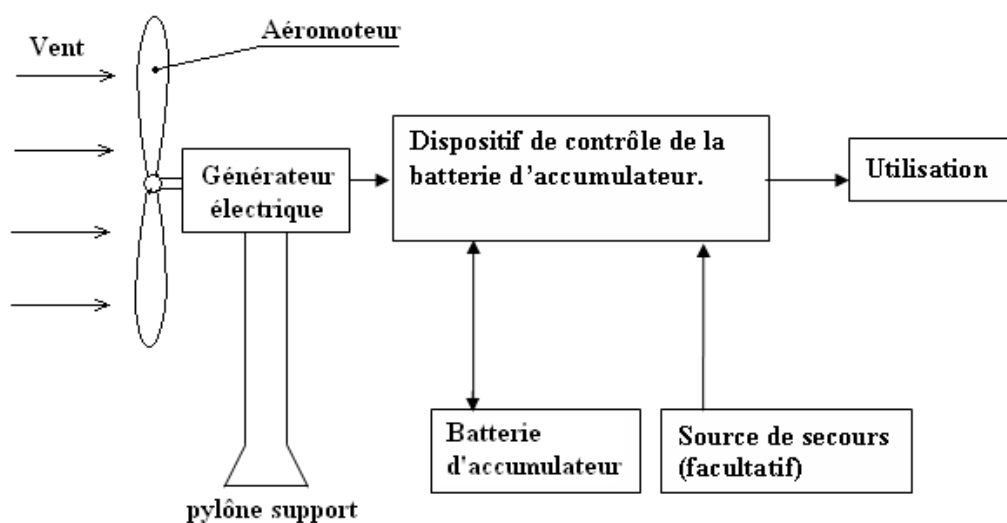


Figure 3: Les éléments constitutants d'une éolienne

Le support

Les pylônes peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être auto porteurs et auto résistants ou haubanés. Si l'haubanage permet de réduire les dimensions du mât, par contre il pénalise l'emprise au sol. Pour limiter l'occupation du sol, le support de plusieurs éoliennes par une seule structure est envisagé ; dans ce cas, les pylônes constitués de structures métalliques en treillis sont intéressants. Actuellement les mâts en caisson, souvent en acier est fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance.

Les problèmes de corrosion et de montage sont les paramètres principaux dans les choix de la solution à adopter. Ces pylônes doivent supporter des vents avec une vitesse supérieure à 50 m/s (cas des pylônes).

Les pales

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

- ❖ La longueur,
- ❖ La largeur
- ❖ Le profil
- ❖ Les matériaux
- ❖ Le nombre de pale

Longueur

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

Largeur

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

Le profil

Il est choisi en fonction du couple désiré.

Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (≥ 100 kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice.

Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

Les matériaux

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié 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 marche.

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 œuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

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

Nombre de pales

Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

Systèmes 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.

- Système de contrôle par force centrifuge

On le trouve, par exemple, dans les éoliennes de Vergnet ou celles d'Electro Vent. Lorsque la vitesse augmente, les deux masses tendent à s'écarter du centre et orientent des freins aérodynamiques qui ralentissent considérablement la rotation. Un tel dispositif doit néanmoins être bien calibré pour être efficace et devrait sans doute se limiter à des usages dans des régions (ou à des saisons) tempérées /chaudes.

- Régulation et freinage par gouvernail articulé

A partir d'un certain niveau de vent, jugé excessif pour la sécurité mécanique de l'éolienne, le gouvernail se replie progressivement et automatiquement en travers de l'axe du vent. Non seulement il freine l'écoulement, ralentissant la vitesse, mais il détourne l'éolienne de la perpendiculaire au vent. Celle-ci devient alors de moins en moins efficace et sa vitesse ne peut augmenter même si le vent force.

- Régulation et freinage par basculement de l'éolienne sur le dos :

Variante du précédent puisqu'il consiste à sortir le rotor du lit du vent. Plus le vent ne force sur le rotor, puis il comprime le ressort qui tenait la tête de l'éolienne verticale. Par des grands vents, la nacelle se couche. Ce mécanisme n'est possible que sur de petite éolienne et il crée, comme l'autre des efforts irréguliers sur les pales.

- Régulation aérodynamique sur les pales

Le pas variable permet de mettre les pales en drapeau, ce qui arrête l'éolienne et la protège des grands vents. Le pas fixe utilise « l'effet Stall » pour empêcher la pale d'accélérer, ce qui revient à agir comme un frein. Enfin, on peut installer des « flaps » ou aérofreins sur les pales qui sont des volets ouvrant automatiquement si quelque chose ne va pas (vitesse excessive, problème décelé sur l'éolienne).

- Arrêt par frein à disque automatique

A un certain seuil prédéterminé, un détecteur de vitesse déclenche un mécanisme automatique d'arrêt complet de l'éolienne. Il ne s'agit plus d'un système de ralentissement mais bien d'un stoppage complet. Lorsque le vent baisse d'intensité, le frein est relâché et l'éolienne est de nouveau libérée. Ces arrêts peuvent aussi être déclenchés lorsque l'automate détecte un problème de réseau.

Le multiplicateur

Le multiplicateur est un convertisseur de puissance : il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique. 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.

3 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.

Un générateur électrique

Il peut être :

Soit directement accouplé à l'aéromoteur : dans le cas le plus simple, l'hélice est montée directement sur l'axe du générateur électrique ;

Soit entraîne par un multiplicateur placé entre l'aéromoteur et le générateur électrique .En effet nous verrons que la fréquence de rotation est liée au diamètre de l'hélice et qu'elle diminue lorsque le diamètre augmente.

Pour avoir autant d'énergie électrique il est nécessaire d'augmenter la fréquence de rotation obtenue avec l'aéromoteur avant d'entraîner le générateur électrique.

Ce générateur électrique pourra être fournissant d'un courant continu directement utilisable pour charger une batterie, soit un alternateur. Pour raison de coût et de rendement, les constructeurs d'aérogénérateur s'orientent de plus en plus l'utilisation des alternateurs.

Un dispositif de stockage de l'Energie produite

Dans la plupart des cas ; la station devra comporter un moyen de stockage d'énergie pour couvrir les périodes sans vent. Il existe différent moyens de stockage qui seront évoqués plus tard mais actuellement le moyen de stockage le plus facile et le moins coûteux à mettre en œuvre pour les stations isoler reste les batteries d'accumulateur au plomb.

Chapitre 3. ETUDES THEORIQUES

1. Aérodynamisme

L'air a une masse, mais sa densité est faible. Lorsque la masse est en mouvement avec une vitesse V , son énergie cinétique est exprimée par :

$$E_c = \frac{1}{2} MV^2 \quad (1.3.1)$$

Avec :

$$M = \rho SV$$

Où :

M : Masse d'air traversant le rotor en une seconde en Kg

S : Surface balayée par la rotation des pales

ρ : Masse volumique de l'air évaluée dans les conditions normales de pression et de température en Kg/m³

V : Vitesse du vent en m/s.

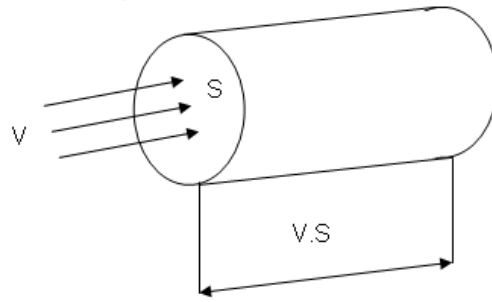
On peut écrire :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho SV^3 \quad (1.3.2)$$

La puissance mécanique traversant la section S en une seconde vaut :

$$P = \frac{1}{2} \rho SV^3 \quad (1.3.3)$$

La puissance qui traverse la surface S est l'énergie cinétique de l'air qui passe par seconde à travers S



1.1 Théorie de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 .

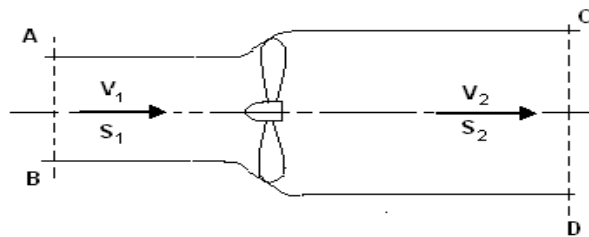


Figure 4: Tube de courant d'air

Soient S_1 et S_2 les sections amont et aval de la veine. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (1.3.4)$$

Et la puissance absorbée par le rotor est :

$$P = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (1.3.5)$$

La variation de l'énergie cinétique de la masse d'air traversant le rotor pendant un temps $t = 1s$ est :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho S V (V_2^2 - V_1^2) \quad (1.3.6)$$

Exprimons maintenant que la puissance absorbée par l'aéromoteur est égale à la variation ΔE_c qui traverse par seconde l'éolienne. Il vient :

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

On en tire :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1.3.7)$$

La puissance admet une valeur maximale suivant une valeur de la vitesse V_2 .

Pour $\frac{dP}{dV_2} = 0$, l'équation admet deux racines :

$$V_2 = -V_1 \text{ n'a aucun sens physique}$$

$$V_2 = \frac{V_1}{3}, \text{ qui correspond à un maximum de la puissance}$$

En reportant cette valeur particulière de V_2 dans l'expression de P , on obtient pour la puissance maximale susceptible d'être recueillie, la valeur :

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 = 0,37 S V_1^3 \quad (1.3.8)$$

en prenant pour ρ la valeur $1,25 \text{ Kg/m}^3$

Cette relation constitue la formule de Betz.

Pour caractériser les pertes au contact du vent avec les pales, on introduit un coefficient appelé « coefficient de puissance : C_p »

D'où :

$$P = \rho S V_1^3 \frac{8}{27}$$

$$\Rightarrow P_{\max} = \rho S V_1^3 \frac{8}{27} = C_p \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \frac{16}{27} \quad (1.3.9)$$

$$C_{p\max} = C_p \frac{16}{27} = 0,59 C_p \quad (1.3.10)$$

C'est la limite de Betz

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est de 59 %. Grâce à l'amélioration du profil et du revêtement des pales, les machines actuelles peuvent approcher les 50 %. Mais l'utilisation de systèmes de carénage permet d'élargir la surface balayée et donc de dépasser les fameux 59 %.

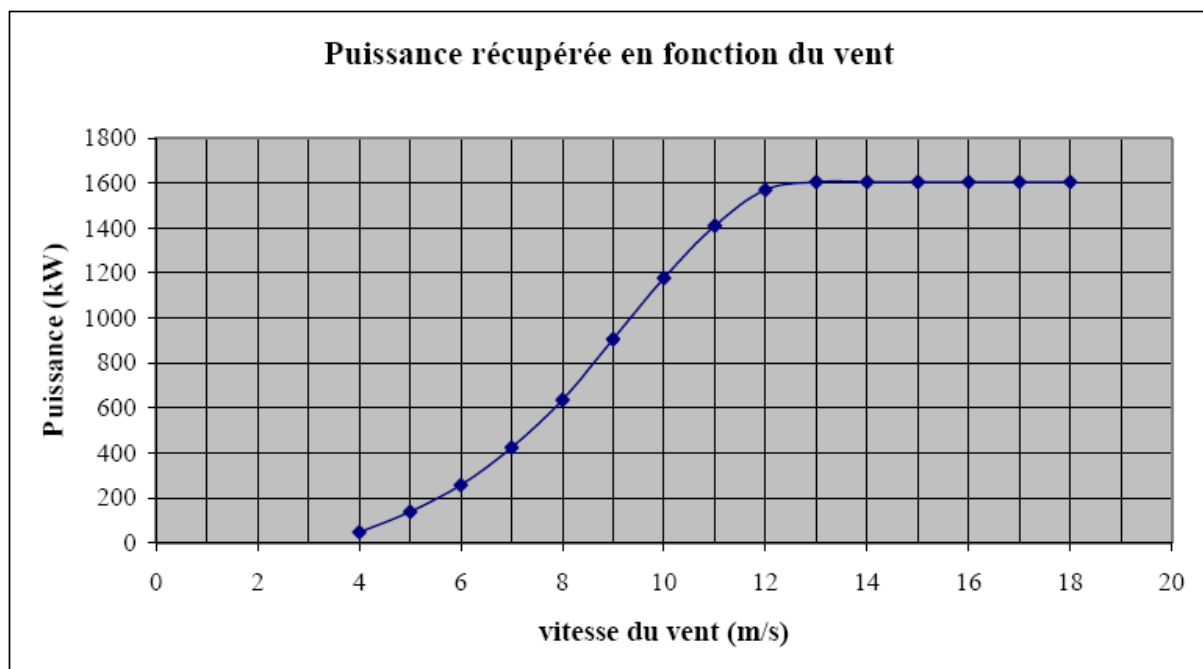


Figure 5: Puissance récupérée en fonction du vent

1.2 Grandeurs caractéristiques

En réalité, une hélice réelle ne peut pas fournir une puissance maximale égale à la limite de Betz, mais seulement un pourcentage de cette puissance limite. Le rapport entre la puissance réelle transformée P_m (puissance recueillie sur l'arbre

moteur du capteur) et la puissance théorique est appelée rendement ou coefficient de puissance « C_p ».

$$P_m = C_p P_{\max} \quad (1.3.11)$$

Ce coefficient de puissance C_p dépend du type d'hélice et de ces conditions d'utilisation. Ainsi, pour définir une hélice, il est nécessaire de connaître ses dimensions, son coefficient de puissance fonction du chiffre de vitesse « λ » et de la vitesse du vent « V ».

$$C_p = f(\lambda, V)$$

Le chiffre de vitesse ou vitesse spécifique « λ » est défini comme le rapport entre la vitesse périphérique de l'hélice en bout de pale de la vitesse de vent :

$$\lambda = \omega \frac{R}{V} \quad (1.3.12)$$

Avec :

ω : vitesse de rotation de l'hélice

R : Rayon de l'hélice

On définit aussi un autre paramètre important qui est le coefficient du couple « C_c » : c'est le rapport du couple moteur « C_m » qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien et le couple aérodynamique « C_a ».

$$C_c = \frac{C_m}{C_a} = \frac{C_p}{\lambda} \quad (1.3.12)$$

Avec :

$$C_m = \frac{P_m}{\omega}$$

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

1.3 Variation de pression à travers l'éolienne

A l'amont du disque balayé par l'éolienne, la pression est plus importante qu'à l'aval.

Cette différence de pression est à l'origine de la force exercée par le vent sur l'éolienne. On peut écrire :

$$F = \rho \frac{S(V_1^2 - V_2^2)}{2} = S\Delta p \quad (1.3.13)$$

Où, S : la surface balayée.

Δp : la différence de pression.

F : la force exercée par le vent.

D'où la valeur de la différence de pression Δp sera :

$$\Delta p = \rho \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \quad (1.3.14)$$

2. Notion sur l'aile portante

Pour bien comprendre le fonctionnement et surtout pour dimensionner de façon optimale les principaux éléments de l'éolienne, il est indispensable d'avoir quelques notions concernant le tracé des polaires d'aile. La formule de Betz ne nous indique pas, comment construire les pales.

Considérons un profil d'aile dans un vent de vitesse V représenté par la figure suivante :

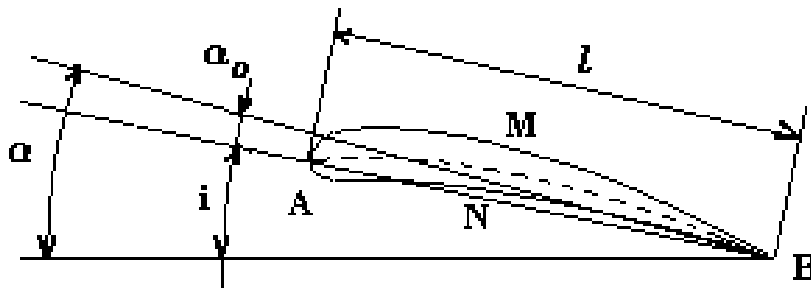


Figure 6: Profil d'aile

2.1 Définitions

On appelle

- **Bord d'attaque** : les points du profil les plus éloignés des points B où se trouve le bord fuite
- **AB** : corde de référence
- **l** : profondeur du profil
- **AMB** : extrados du profil
- **ANB** : intrados du profil
- **Squelette du profil** ou **ligne moyenne** : c'est le milieu des segments perpendiculaires à la corde de référence MN
- **Angle d'incidence du profil** : c'est l'angle i formé par la corde de ce profil et la vitesse relative
- **Angle de portance nulle** : c'est l'angle de portance α_0 pour lequel la portance d'un profil est nulle. Cet angle est généralement négatif avec les profils usuels
- **Angle de portance** : c'est l'angle α de la vitesse relative avec la direction de portance nulle

Algébriquement, on a les valeurs :

$$i = \alpha + \alpha_0$$

$$\alpha = i - \alpha_0 \quad (1.3.15)$$

En pratique, on peut classer les profils en :

- Profil biconvexe : extrados et intrados convexe
- Profil plan convexe extrados convexe, intrados plan

- Profil creux extradors convexe, intrados concave
- Profil à double courbure : extradors et intrados concaves vers la queue

On distingue à l'intérieur de ces catégories les profils minces pour lesquels le quotient de l'épaisseur maximale du profil par la corde de référence $e = \frac{h}{l}$ est inférieur à 6%.

Les profils semis épais : pour $6\% < e < 12\%$

Les profils épais : pour $e > 12\%$

2.2 Action de l'air sur l'aile en mouvement

Considérons une aile en mouvement par rapport à l'air. Expérimentalement, dans le cas où l'aile est disposée comme indiquée sur la figure par rapport au vecteur V , il y a 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.

$$K_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho_0 V_0^2} \quad (1.3.16)$$

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

P_0, ρ_0, V_0 : les conditions à l'infini.

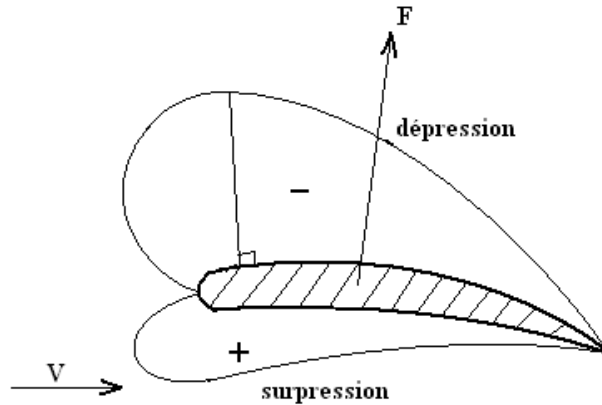


Figure 7: Répartition des pressions sur la pale

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 V . Cette force s'appelle action aérodynamique totale ou résistance de l'air.

Elle a pour expression :

$$F = \frac{1}{2} C_r \rho V^2 S_c L \quad (1.3.17)$$

ρ : la masse spécifique de l'air.

C_r : le coefficient aérodynamique total (sans dimension).

S_c : la surface caractéristique du corps, produit de la longueur de la corde par la longueur de la pale.

2.3 Coefficient aérodynamique de portance, de traînée et de moment

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

Une composante F_z : cette composante est appelée portance qui est normale à la vitesse V , orientée positivement de bas vers le haut.

Une composante F_x : elle est appelée « traînée » qui est parallèle à la vitesse.

Ces composantes sont liées à la vitesse V à l'infini par la relation :

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho V^2 S \quad (1.3.18)$$

$$F_z = \frac{1}{2} C_z \rho V^2 S$$

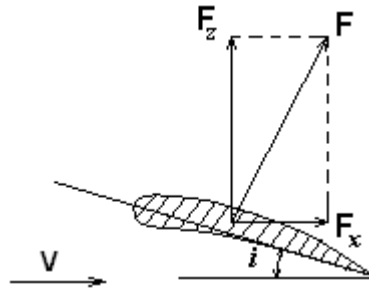


Figure 8: La traînée et la portance

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

$$F_x^2 + F_z^2 = F^2 \quad (1.3.19)$$

Et par analogie :

$$C_x^2 + C_z^2 = C_r^2 \quad (1.3.20)$$

On définit aussi un coefficient de moment C_m par la relation :

$$M = \frac{1}{2} C_m \rho V^2 S l \quad (1.3.21)$$

M : le moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque

l : la profondeur du profil

La position x_p du centre de pression par rapport au bord d'attaque est déterminée par le coefficient :

$$C_p = \frac{x_p}{l} = \frac{C_m}{C_z} \quad (1.3.22)$$

2.4 Représentation graphique des coefficients aérodynamiques C_z et C_x

On peut représenter les coefficients aérodynamiques sous plusieurs façons telles que :

- Représentation de ces coefficients en fonction de l'incidence.
- Polaire d'Eiffel.
- Polaire de Lilienthal.

Variation des coefficients C_z et C_x en fonction de l'incidence

La valeur de ces coefficients dépend de l'incidence i , la figure ci-après relative à un profil d'aile d'avion montre que C_x passe par un minimum en fonction de l'incidence et que la courbe C_z admet un maximum et un minimum. Ce maximum et ce minimum de C_z correspondent en fait tous deux à des minimums de portance. Le minimum de la courbe correspond à la portance maximale pour des incidences négatives (vol sur le dos). Le maximum se rapporte à la portance maximale pour les incidences positives (vol normal).

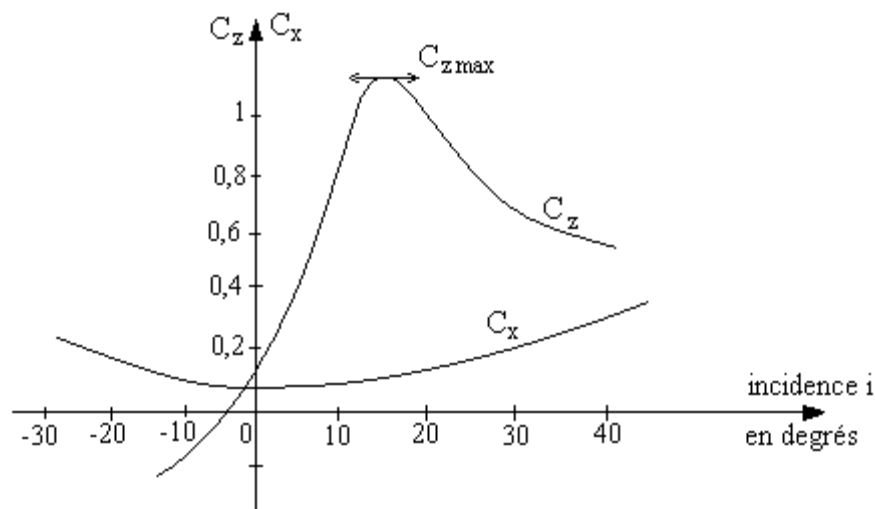


Figure 9: Variation des coefficients C_z et C_x en fonction de l'incidence i

Polaire d'Eiffel

La polaire d'Eiffel d'une aile consiste à construire la courbe obtenue en portant en abscisse le coefficient de traînée C_x et en ordonnée le coefficient de portance C_z .

Les graphiques montrées par la figure ci-dessous représentent la polaire d'une même aile avec des échelles différentes selon des abscisses.

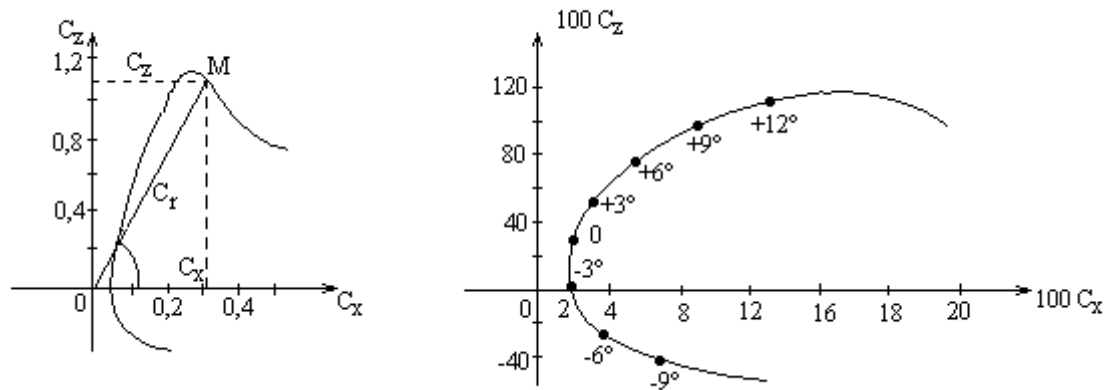


Figure 10: Polaire d'Eiffel

Le quotient de la portance par la traînée est appelé finesse.

$$f = \frac{C_z}{C_x} = \tan \theta \quad (1.3.24)$$

La finesse f est maximale lorsque OM est tangente à la polaire ($\theta = \theta_M$).

On note comme observation que les résultats ci-dessus s'appliquent à des ailes d'envergure infinie. Si l'aile est d'envergure limitée, en général, il faut ajouter à la force F_x précédente une traînée supplémentaire dite traînée induite telle que :

$$F_{x_i} = \frac{1}{2} C_{x_i} \rho V^2 S \quad (1.3.25)$$

Cette force de résistance supplémentaire est due à l'apparition de tourbillons qui se détachent de l'aile par suite de l'allongement limité de celle-ci.

Dans ce cas, le coefficient de traînée devient :

$$C_x = C_{x_0} + C_{x_i} \quad (1.3.26)$$

C_{x_0} : Le coefficient d'envergure infini.

Pour assurer la sustentation, il faut que l'angle d'incidence soit augmenté d'un angle φ appelé angle induit. Dans ce cas, la nouvelle incidence est :

$$i = i_0 + \varphi \quad (1.3.27)$$

On montre en mécanique des fluides que, dans l'hypothèse où la répartition de la circulation est elliptique, C_{x_i} et φ sont donnés par les relations :

$$C_{x_i} = \frac{S}{L^2} \frac{C_z^2}{\pi} = \frac{C_z^2}{\pi a} \quad (1.3.28)$$

$$\varphi = \frac{S}{L^2} \frac{C_z}{\pi} = \frac{C_z}{\pi a} \quad (1.3.29)$$

S : la surface de l'aile

L : sa plus grande dimension

a : l'allongement, où $a = L^2/S$

Polaire de Lilienthal

Si l'on projette la force aérodynamique F sur la corde du profil et sur la normale de cette corde, on obtient pour composantes.

Composante suivant la normale :

$$F_n = \frac{1}{2} \rho S V^2 (C_z \cos i + C_x \sin i) \quad (1.3.30)$$

Composante suivant la corde :

$$F_t = \frac{1}{2} \rho S V^2 (C_x \cos i - C_z \sin i) \quad (1.3.31)$$



Figure 11: Polaire de Lilienthal

En posant

$$C_n = C_z \cos i + C_x \sin i \quad (1.3.32)$$

$$C_t = C_x \cos i - C_z \sin i \quad (1.3.33)$$

L'expression de ces composantes devient :

$$F_n = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_n \quad (1.3.34)$$

$$F_t = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_t \quad (1.3.35)$$

La **polaire de Lilienthal** est la courbe représentative de la variation du coefficient C_n en fonction de C_t .

Cette courbe est utilisée pour la détermination des épaisseurs à donner au profil en vue de sa résistance aux efforts aérodynamiques.

3. Aérodynamique de l'hélice

3.1 Caractéristiques géométriques

L'hélice comporte des caractéristiques géométriques que l'on va définir ci-après :

- **Axe de l'hélice** : c'est l'axe de rotation de l'hélice,
- **Diamètre de l'hélice** : c'est le diamètre du cercle balayé par les 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 d'une pale** : c'est la section de la pale engendrée par le cylindre d'axe, le même que l'hélice (ce profil de la pale varie avec la distance r qui sépare le profil de l'axe de l'hélice). Représenté par les figures suivantes.

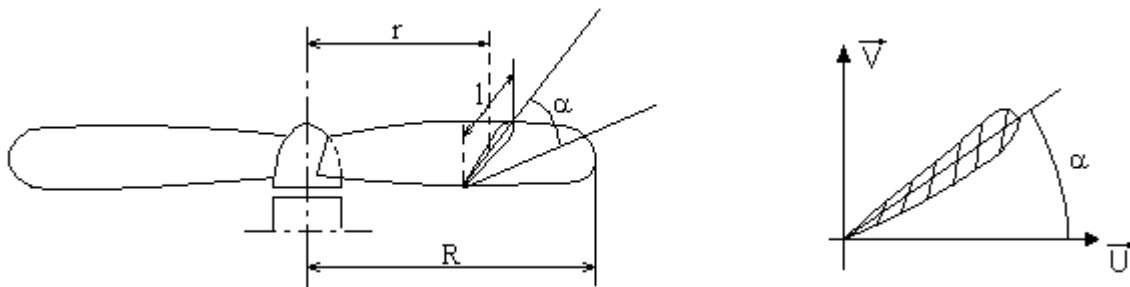


Figure 12: Caractéristiques géométriques d'une pale

- **Angle de calage d'un profil** : c'est l'angle α que fait la corde du profil avec le plan de rotation de l'hélice,
- **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 correspondant à une avance fictive pour une rotation d'un tour d'une hélice,

L'expression du pas H d'une section en fonction de l'angle de calage α sera :

$$H = 2\pi r \tan \alpha \quad (1.3.36)$$

Et l'angle de calage d'une hélice à pas constant vérifie la relation :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{k}{r} \quad (1.3.37)$$

3.2 Evaluation de la vitesse relative du vent W et étude des actions aérodynamiques

La figure suivante représente une section d'une pale située à la distance r de l'axe de rotation et d'angle de calage α .

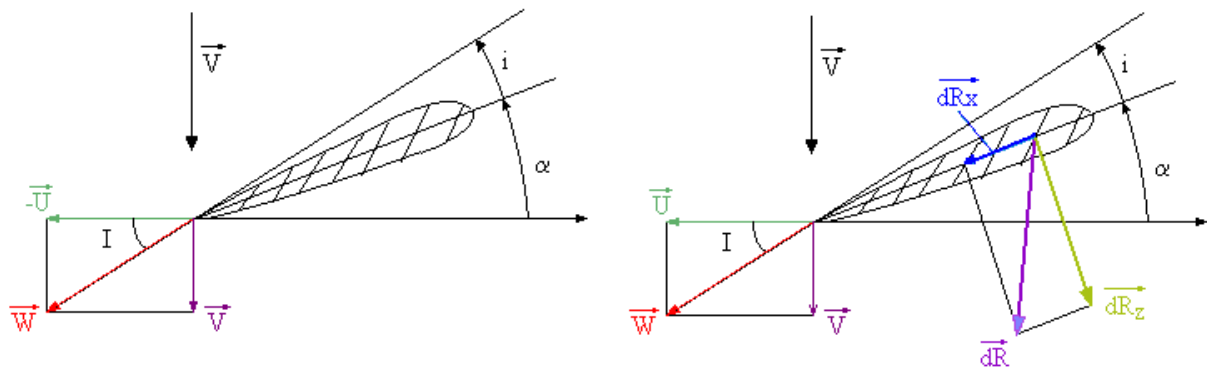


Figure 13: Les efforts aérodynamiques

Au point de vue aérodynamique, l'air arrivait sur le profil suivant la direction W ,

où: I : l'angle que fait W avec le plan de rotation de l'hélice, avec $i = I - \alpha$.

i : l'angle d'incidence.

W : la résultante de la vitesse V et d'un vecteur vitesse opposée à U ,

$U = 2\pi rN$, et qui est due à la rotation de l'hélice autour de son axe.

N : la fréquence de rotation de l'hélice.

Donc finalement, la vitesse relative du vent a pour l'expression suivante :

$$W = \sqrt{V^2 + U^2} \quad (1.3.38)$$

Vectoriellement, la vitesse relative est de :

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad (1.3.39)$$

A la distance r de l'axe de rotation, la cotangente de l'angle d'inclinaison I et la vitesse relative du vent sont respectivement données par les expressions suivantes :

$$\cot g I = \frac{U}{V} = \frac{\omega r}{V_1} \cdot \frac{1+h}{1+k} = \lambda \frac{1+h}{1+k}$$

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r(1+h)}{2 \cos I} \quad (1.3.40)$$

Appelons dR_x et dR_z les composantes de la force aérodynamique dR qui s'exerce sur l'élément de la pale suivant la direction W et suivant la direction perpendiculaire. Ces composantes ne sont autres que la traînée et la portance du profil considéré dans un vent d'intensité W .

3.3 Evaluation des efforts axiaux et tangentiels et calcul des couples

Considérons l'élément de pale compris entre les distances r et $r+dr$.

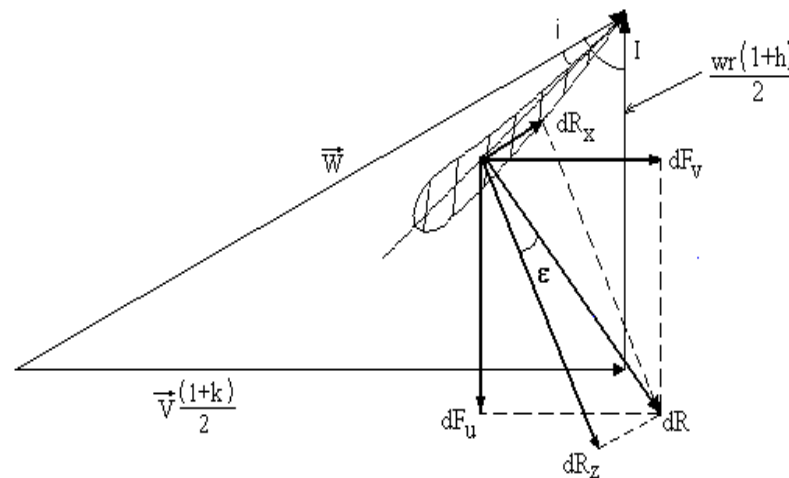


Figure 14: Les efforts sur l'élément de pale

Calculons les efforts qui s'exercent sur cet élément en fonction de la vitesse relative du vent de la manière suivante, en considérant l'action aérodynamique directe et ensuite par les théorèmes généraux de la mécanique.

Comme on a précédemment :

$$dR_x = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 dS = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 l dr \quad (1.3.41)$$

$$dR_z = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 dS = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 l dr \quad (1.3.42)$$

Nous allons nommer dR_x et dR_z par les composantes de la force aérodynamique dR qui s'exerce sur l'élément suivant la direction W et suivant la direction perpendiculaire

Ce qui donne par projection sur l'axe de l'éolienne, pour la composante axiale :

$$dF_v = dR_z \cos I + dR_x \sin I = \frac{1}{2} \rho l W^2 dr (C_z \cos I + C_x \sin I) \quad (1.3.43)$$

Et par projection sur la vitesse U , pour la composante tangentielle :

en posant :

$$\tan \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z} \quad (1.3.44)$$

Ces expressions peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$dF_v = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_z \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (1.3.45)$$

$$dF_u = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_z \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (1.3.46)$$

La contribution des éléments de pales de l'éolienne situés entre les distances $r + dr$ s'élève par conséquent dans la poussée axiale et dans le couple moteur respectivement à :

$$dF = p dF_v = \frac{1}{2} \rho p l W^2 C_z \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr$$

$$dM = r p dF_u = \frac{1}{2} \rho p r l W^2 C_z \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (1.3.47)$$

Où, p : le nombre de pales.

ρ : la masse volumique de l'air

3.4 La poussée du vent sur l'hélice et le couple moteur produit

La poussée axiale totale F exercée par le vent sur l'éolienne et le couple moteur C produit s'obtiennent en additionnant respectivement toutes les forces élémentaires dF et tous les moments élémentaires dM agissant sur les pales. Et la puissance fournie par le vent à l'hélice sera :

$$P = \sum dF.V = F.V \quad (1.3.48)$$

Et la puissance recueillie sur l'arbre sera :

$$P_u = M\omega \quad (1.3.49)$$

Le rendement de l'hélice sera :

$$\eta = \frac{P_u}{P} = \frac{M\omega}{FV} \quad (1.3.50)$$

ω : la vitesse angulaire de l'hélice.

4. Etablissement d'une relation pour le calcul de la largeur des pales

Pour déterminer la largeur à donner aux pales, nous évaluerons de deux manières, dans les conditions optimales de fonctionnement, la poussée axiale sur les profils compris entre r et $r+dr$.

4.1 Première évaluation

D'après la théorie de Betz, la poussée axiale totale sur l'ensemble de l'éolienne est égale à :

$$F = \frac{\rho S}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.3.51)$$

La vitesse du vent à la traversé de l'éolienne étant telle que :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

La puissance est maximale pour $V_2 = \frac{V_1}{3}$

On a alors : $F = \frac{4}{9} \rho S V_1^2$ et $V = 2 \frac{V_1}{3}$

Et par conséquent:

$$F = \rho S V^2 \quad (1.3.52)$$

Admettons que chaque élément de la surface balayée contribue proportionnellement à son aire dans la poussée axiale.

La contribution dans cette poussée, des éléments compris entre les distances r et $r+dr$ est :

$$dF = \rho V^2 dS = 2\pi \rho V^2 r dr \quad (1.3.53)$$

4.2 Deuxième évaluation

La vitesse de rotation étant ω , la vitesse d'entraînement des éléments de pales compris entre les cylindre de rayon r et $r+dr$ est $U = r\omega$

Entre la vitesse absolue du vent \vec{V} à la traversé de l'éolienne, la vitesse relative du vent \vec{W} par rapport aux profils d'aile considérés et la vitesse d'entraînement \vec{U} existe la relation :

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$$

Qui peut s'écrire : $\vec{W} = \vec{V} - \vec{U}$

Représentons un élément de pale de longueur dr en coupe. Evaluons les efforts aérodynamiques auxquels il est soumis.

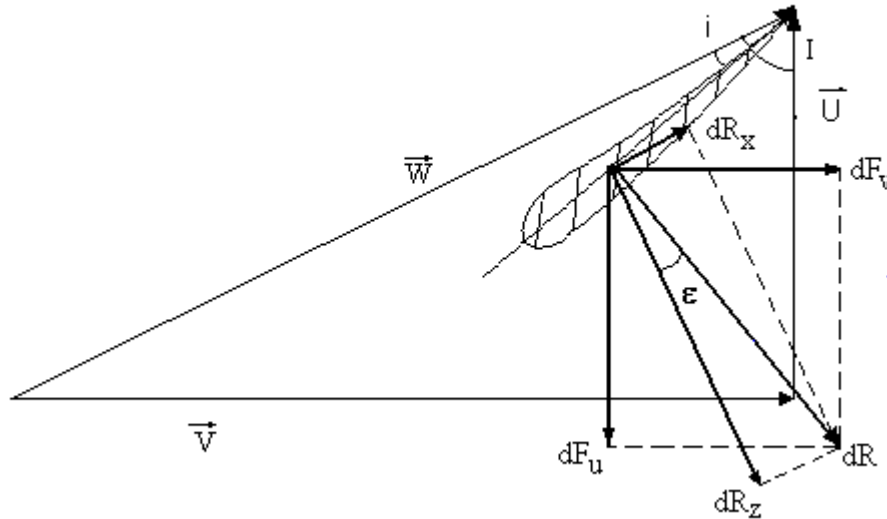


Figure 15: Efforts aérodynamiques sur un élément de la pale

On a :

$$dR = \frac{dR_z}{\cos \varepsilon}$$

Avec ε = la corde du profil à la distance r

On en tire, en remarquant que : $W = \frac{V}{\sin I}$

$$dR = \frac{1}{2} \rho C_z \frac{W^2 l}{\cos \varepsilon} dr = \frac{1}{2} \rho C_z \frac{V^2}{\sin^2 I} \cdot \frac{l}{\cos \varepsilon} dr \quad (1.3.54)$$

Projetons dR sur la direction de l'axe de rotation et calculons la contribution dF des profils compris entre r et $r+dr$ dans la poussée axiale sur l'éolienne. Il vient :

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_z p \frac{V^2}{\sin^2 I} \cdot \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} l dr \quad (1.3.55)$$

Avec p le nombre de pales.

En identifiant,

$$C_z pl = 4\pi r \frac{\sin^2 I \cos \varepsilon}{\cos(I - \varepsilon)} \quad (1.3.56)$$

Cette relation peut encore s'écrire en développant $\cos(I - \varepsilon)$

$$C_z pl = 4\pi r \frac{\sin^2 I \cos I}{1 + \sin \varepsilon \cdot \sin I} \quad \text{Avec} \quad \sin \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$$

Dans les conditions optimales de fonctionnement, la vitesse du vent à la traversée de l'éolienne est $V = 2 \frac{V_1}{3}$

L'angle d'inclinaison I est alors lié à la vitesse du vent V_1 par la relation :

$$\cot g I = \frac{\omega r}{V} = \frac{3\omega r}{2V_1} = \frac{3\lambda}{2}$$

$$\text{Donc nous avons : } C_z pl = \frac{16\pi}{9} \cdot \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}}} \quad (1.3.57)$$

Les vitesses spécifiques λ à la distance r de l'axe de rotation $\lambda = \frac{\omega r}{V_1}$ et l'extrémité

de la pale $\lambda_0 = \frac{\omega R}{V_1}$ sont liées entre elles par la relation $\lambda = \lambda_0 \frac{r}{R}$

La relation précédente peut s'écrire :

$$C_z pl = \frac{16\pi}{9} \cdot \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \cdot \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}} \quad (1.3.58)$$

Partie II. ETUDE DE CONCEPTION

On veut concevoir un petit aérogénérateur tripale de 100cm de diamètre, dont le démarrage est possible à un vent de vitesse $V_{\text{dem}} = 3\text{m/s}$ et la vitesse nominale du vent est de $V_{\text{nom}} = 6\text{m/s}$, et la vitesse spécifique sera de $\lambda_0 = 4$. Avec tous ces paramètres, on va calculer les caractéristiques des pales et les efforts ainsi que des couples appliqués à l'hélice de l'aéromoteur.

Chapitre I. CALCUL DE LA LARGEUR DE LA PALE

1. Choix du profil

Les pales sont profilées à pouvoir suivre l'une des aérodynamiques usuelles et connues par des essais en soufflerie tels les profils NACA 4412, NACA 4415 NACA 4418, NACA 23012, NACA 23015...

Pour notre cas, nous adopterons pour la construction des pales le profil NACA 4412.

Les caractéristiques utilisées sont les suivantes :

- Le coefficient de traînée
- Le coefficient de portance
- Le coefficient de moment
- L'angle de portance nulle
- Le coefficient de moment nul

Les caractéristiques de ce profil sont données par le tableau suivant :

Tableau 6: Caractéristiques du profil utilisé

incidence (en °)	Cz	Cx	Cm (c/4)	Cm/Cz (en %)	X (%)	Y (%)
-16	-0.55		+0.01	-2	1,25	2,44
-14	-0.75		-0.025	+3.3	2,5	3,39
-12	-0.8		-0.045	+5.6	5	4,73
-10	-0.7	0.010	-0.075	+10.7	7,5	5,76
-8	-0.45	0.008	-0.1	+22.2	10	6,59
-6	-0.25	0.007	-0.1	+40	15	7,89
-4	-0.05	0.0065	-0.1	+200	20	8,8
-2	+0.2	0.006	-0.1	-50	25	9,41
0	+0.4	0.006	-0.1	-25	30	9,76
2	+0.6	0.006	-0.1	-16.7	40	9,8
4	+0.8	0.0065	-0.1	-12.5	50	9,19
5	+0.9	0.007	-0.1	-11.1	60	8,14
6	+1.0	0.008	-0.1	-10	70	6,69
7	+1.1	0.009	-0.09	-8.2	80	4,89
8	+1.2	0.0105	-0.08	-6.7	90	2,71
10	+1.3	0.012	-0.075	-5.8	95	1,47
12	+1.45	0.014	-0.07	-4.8	0	0
14	+1.5	0.016	-0.065	-4.3	100	0,13
16	+1.4		-0.065	-4.6	1,25	-1,43
					2,5	-1,95
					5	-2,49
					7,5	-2,7
					10	-2,8
					15	-2,88
					20	-2,74
					25	-2,5
					30	-2,26
					40	-1,8
					50	-1,4
					60	-1
					70	-0,65
					80	-0,39
					90	-0,22
					95	-0,16
					100	0,13

1.1 Variation des coefficients en fonction de l'incidence « i »

Les relations suivantes nous montrent la variation des coefficients de portance et de traînée de ce profil en fonction de l'incidence.

$$C_z(i) = 0,117464 i + 0,363647 \quad i < 4^\circ \quad (2.1.1)$$

$$C_z(i) = -0,008876 i^2 + 0,22947658 i + 0,07662796 \quad i > 4^\circ \quad (2.1.2)$$

$$C_x(i) = 0,000798339 C_z^2 - 0,0002627894 C_z + 0,0006177917 \quad (2.1.3)$$

1.2 Variation de l'incidence « i » en fonction de la distance à l'axe

Nous choisirons comme loi de variation de l'angle d'incidence « i » en fonction de la distance à l'axe « r », l'expression :

$$i = 12,78 - 7,8 \frac{r}{R} \quad (2.1.4)$$

La loi de variation de « i » en fonction de « r » est une loi linéaire entre l'extrémité de la pale ou « $i = i_0$ » et la distance 0,2R où on fixera un minimum à ne pas dépasser.

L'angle d'incidence varie donc de 5° à l'extrémité de la pale ($r = R$), à $11,22^\circ$ à la distance $r = 0.2R$ de l'axe.

1.3 Calcul de la largeur de pale

Comme on a déjà vu précédemment, il y a plusieurs méthodes pour la détermination de la largeur de la pale.

Pour notre étude, on va adopter la méthode de GLAUERT, car cette méthode met en évidence le système tourbillonnaire associé aux pales et le système électrique équivalent.

On déduit du tableau qui présente les valeurs optimales des paramètres de fonctionnement en fonction de I à l'ANNEXE II-2, les valeurs de $\frac{C_z p l}{r}$, I , les coefficients h et k ; à partir de λ_0 et p ainsi on peut déterminer la valeur de la largeur de la pale.

Tableau 7: La largeur de la pale

r/R	r	λ	$i [^\circ]$	$l [^\circ]$	$\alpha [^\circ]$	C_z	$\frac{C_z p l}{r}$	$l(m)$
0,2	0,1	0,8	11,22	34,227	23,007	1,53396975	4,353	0,094
0,4	0,2	1,6	9,66	21,337	11,677	1,46510246	1,723	0,078
0,6	0,3	2,4	8,1	15,08	6,98	1,3530339	0,865	0,063
0,8	0,4	3,2	6,54	11,569	5,029	1,19776407	0,511	0,056
1	0,5	4	4,98	9,357	4,377	0,99929298	0,334	0,055

Avec :

$$\lambda = \lambda_0 \frac{r}{R}$$

Chapitre 2. CALCUL DE LA PUISSANCE FOURNIE PAR L'EOLIENNE

En admettant que l'alternateur et le système multiplicateur de vitesse aient un rendement de 80%. La puissance fournie sur l'arbre sera déterminé par la relation suivante :

$$P_u = 0,80.P_a \quad (2.2.1)$$

Où **P_u** : la puissance à l'entrée de l'alternateur ou puissance utile.

P_a : la puissance fournie sur l'arbre de l'aéromoteur.

Et la puissance de **P_a** se détermine à partir de la relation suivante :

$$P_a = 0,20.D^2.V^3 \quad (2.2.2)$$

1 La puissance fournie au démarrage

La puissance au démarrage sera :

$$P_{a_{\text{dém}}} = 0,20 \times 1 \times 3^3 = 5,4 \text{ W}$$

La puissance utile au démarrage sera : $P_u = 4,32 \text{ [W]}$

2. La puissance fournie en régime nominal

En régime nominal, la vitesse du vent sera de $V = 6 \text{ [m/s]}$

La puissance fournie sur l'arbre sera : $P_{a_{\text{nom}}} = 0,20 \times 12 \times 6^3 = 43,2 \text{ W}$

La puissance utile en régime nominal sera : $P_u = 34,56 \text{ [W]}$

Chapitre 3. VALEUR DE LA VITESSE DE ROTATION ‘N’

On va évaluer la valeur de la vitesse de rotation de démarrage ainsi qu'à une vitesse nominale du vent avec $\lambda_0 = 4$

En connaissant la relation

$$\lambda_0 = \frac{U}{V} = \frac{\pi D N}{V}$$

On peut tirer :

$$N = \frac{\lambda_0 V}{\pi D} \quad (2.3.1)$$

1. La vitesse de rotation au démarrage

Au démarrage la vitesse du vent est de : $V = 3 \text{ m/s}$.

Où :

$$N_{\text{dém}} = \frac{4 \times 3 \times 60}{\pi \times 1} = 229,183 \text{ tr/min}$$

Soit : $N_{\text{dém}} = 230 [\text{tr/min}]$

2. La vitesse de rotation à la vitesse du vent nominale

La vitesse du vent nominale est de : $V_{\text{nom}} = 6 [\text{m/s}]$;

$$\text{Où : } N_{\text{nom}} = \frac{4 \times 6 \times 60}{\pi \times 1} = 458,366 \text{ tr/min}$$

Soit $N_{\text{nom}} = 458 [\text{tr/min}]$

Chapitre 4. EVALUATION DES EFFORTS AXIAUX ET TANGENTIAUX – CALCUL DU COUPLE MOTEUR

Les valeurs des efforts et du couple qu'on vient d'évaluer sont des valeurs calculées au démarrage de la machine.

1. La vitesse relative 'W'

La vitesse relative est calculée en employant les valeurs des coefficients h et k dans le tableau de l'ANNEXE II-2- et en appliquant la relation suivante :

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r(1+h)}{2 \cos I} \quad (2.4.1)$$

1.1 Evaluation de la vitesse relative du vent au démarrage

Au démarrage la vitesse angulaire de l'éolienne est de :

$$\omega = 2\pi N = 24 [rad / s]$$

Les résultats et le détail de calcul sont à l'ANNEXE III-1

1.2 Evaluation de la vitesse relative du vent en régime nominal

Dans ce cas $V = 6[m/s]$;

$$\omega = 48 [rad / s]$$

Les résultats et le détail de calcul sont à l'ANNEXE III-2

2. La poussée axiale et le couple moteur

Comme on a vu dans la partie théorique, la contribution des éléments de pale de l'éolienne entre les distances r et r+dr s'élève par conséquent dans la poussée axiale et dans le couple moteur sont représentés respectivement par les relations suivantes :

$$dF = p dF_v = \frac{1}{2} \rho p l W^2 C_z \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (2.4.2)$$

$$dM = r p dF_u = \frac{1}{2} \rho p l r W^2 C_z \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (2.4.3)$$

Et la poussée axiale et le couple moteur sont obtenus en additionnant respectivement tous les éléments dF ainsi que les éléments dM.

2.1 Evaluation au démarrage

La valeur de la poussée axiale et celle du couple moteur au démarrage sont respectivement :

$$F = 4,58588121 \text{ [N]}$$

$$C = 0,21047832 \text{ [Nm]}$$

Les détails de calcul se trouvent dans l'ANNEXE III-3

2.2 Evaluation à la vitesse du vent nominale

Dans ce cas La valeur de la poussée axiale et celle du couple moteur sont respectivement :

$$F = 18,3435332 \text{ [N]}$$

$$C = 1,836088251 \text{ [Nm]}$$

Les détails de calcul se trouvent dans l'ANNEXE III-4

Chapitre 5. CALCUL DES PALES AU POINT DE VUE DE LA RESISTANCE DES MATERIAUX :

Les pales doivent résister en marche normale, aux forces centrifuges, au moment de flexion dû aux rafales de vent et aux effets gyroscopiques qui apparaissent lors de changement de la direction du vent.

Elles doivent également supporter sans détérioration, lors de l'arrêt du rotor qui est freiné ; la raison pour laquelle les vents et les ouragans très violents

1. Matériaux employés pour la confection des pales

Contrairement à ce qu'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.

Pour tous les aérogénérateurs modernes, il semble bien que ce soit dans le mode de réalisation des pales qu'il ait le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche tout en conservant des prix qui ne transforment pas les machines en prototypes éternels non commercialisables.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels, c'est même le point qui fait la qualité d'un aérogénérateur.

Le matériau utilisé pour construire les pales doit répondre pour les aérogénérateurs à fréquence de rotation élevée à plusieurs exigences parfois contradictoires :

- Assez léger ;
- Parfaitement homogène de façon à faciliter la reproductibilité ;
- Non déformable ;
- Résistant à la fatigue mécanique (en particulier aux contraintes alternées dues au fonctionnement des machines tournantes et aux vibrations) ;
- Résistant à l'érosion et à la corrosion ;
- De mise en œuvre ou d'usinage simple ;
- D'un coût suffisamment faible pour que l'aéromoteur soit constructible et commercialisable.

Actuellement, on rencontre 4 types de matériaux pour la réalisation des pales d'hélice, mais pour notre cas on utilise le bois de masse volumique est de 800 à 1000[kg/m3].

Il présente plusieurs avantages : il est simple, léger, facile à travailler, et il résiste bien à la fatigue ; dont les caractéristiques mécaniques sont données par les tableaux suivants :

2. Caractéristiques mécaniques des bois

Tableau 8: Catégories des bois selon la qualité

Catégories	Définitions	Masse volumique [t/m3]	Pente du fil
1	Bois de haute résistance, sain et scié à vives arêtes, nœuds vifs $\varnothing \leq 30$ mm	Chêne : 0,8 Résineux : 0,5	< 7 %
2	Bois de bon choix, sain et scié à vives arêtes, nœuds $\varnothing \leq 30$ mm.	Chêne : 0,75 Résineux : 0,45	< 12 %
3	Bois de qualité courante.	Chêne : 0,5 Résineux : 0,4	< 18 %

3. Contraintes maximales sur les bois [Mpa]

Tableau 9: Les contraintes admissibles du bois

Sollicitations	Chêne			Résineux		
	1	2	3	1	2	3
Masse volumique [kg/m ³]	800 à 1000	750 à 1000	700 à 1000	500 à 600	450 à 550	400 à 500
Module d'élasticité [Mpa]	1.104 à 1,5.104	1.104 à 1,5.104	1.104 à 1,5.104	0,8.104 à 1,2.104	0,8.104 à 1,2.104	0,8.104 à 1,2.104
Compression longitudinale	13,6	10,9	9,8	13,1	10,3	8,7
Traction axiale	16,4	9,8	3,8	15,2	8,7	2,7
Flexion	14,7	12,5	10,9	14,2	10,9	9,4
Cisaillement longitudinal	2,2	1,6	1,3	1,5	1,3	1,1
Traction transversale	1,3	1,1	0	0,9	0,7	0
Compression transversale	4,9	4,3	3,2	2,7	2,2	1,7

4. Façonnage de la pale

On dispose d'une traverse bien sèche, de longueur et de section suffisante pour le rayon de la pale et pour le façonnage du profil. Pour notre cas le rayon de l'hélice est de $R = 50\text{cm}$, d'où on prend une traverse de $0,70\text{m}$ de 10×10 .

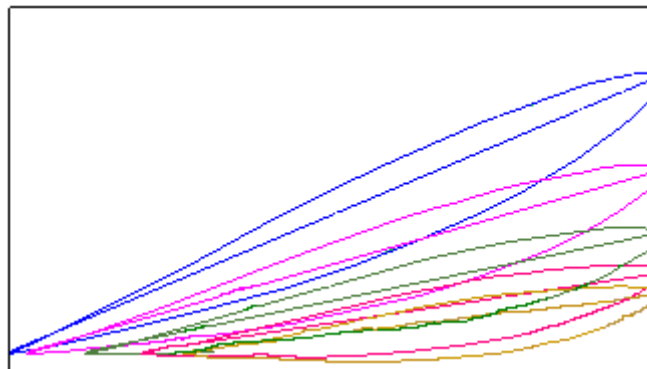


Figure 16: Les différentes sections de la pale

On divise la longueur en sections identiques pour pouvoir repérer les variations des largeurs et les angles de calage.

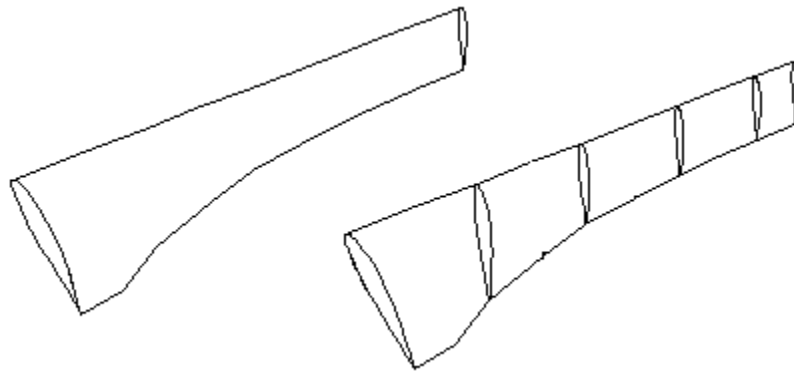


Figure 17: La pale finie

Une fois les sections du profil utilisé sont comprises dans la face transversale du traverse, on enlève au fur et à mesure les surépaisseurs à l'aide d'un outil de menuiserie.

5. Les effets gyroscopiques

Les effets gyroscopiques sont dus aux variations de la direction du vent lors du changement d'orientation de l'axe de l'éolienne.

La rotation autour de l'axe vertical dû au changement de direction fait apparaître une nouvelle vitesse angulaire « Ω ».

La vitesse de rotation autour de l'axe longitudinal reste toujours « ω ».

Considérons une pale dont le moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation horizontal est I_1 et soient deux dièdres mobiles $Oxyz$ (R), tournant avec l'axe de l'éolienne de façon que les vecteurs $\vec{\omega}$ et $\vec{\Omega}$ soient portés par Ox et Oz ; $Oxy'z'$ (R') dont l'axe Oy' est confondu avec celui de la pale.

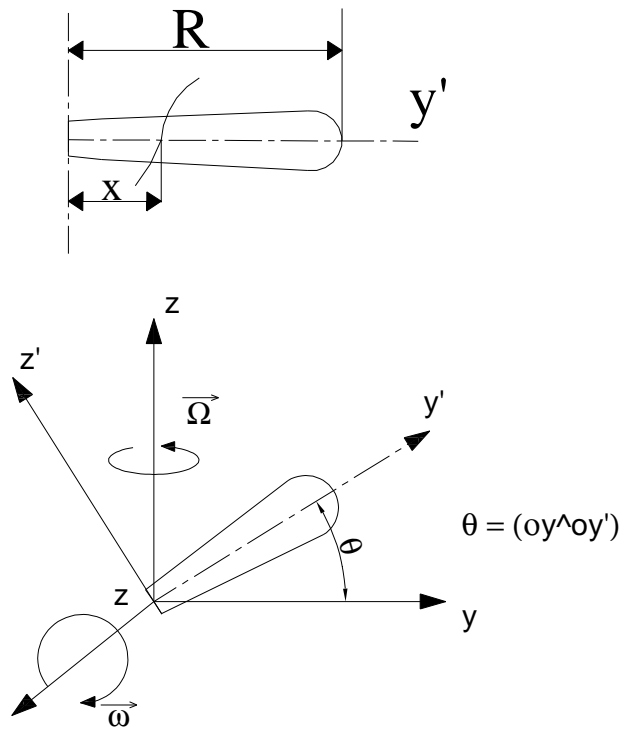


Figure 18: Les pales soumises à des effets gyroscopiques

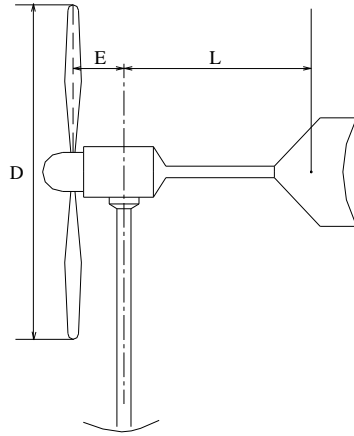
ω : La vitesse angulaire

ζ : La vitesse d'orientation dont l'expression est la suivante :

$$\Omega = \Omega_0 \cos \omega_1 t \quad (2.5.1)$$

6. Dispositif d'orientation

Pour que le fonctionnement soit satisfaisant, certaines conditions doivent être observées.



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

- pour une éolienne multipale, $s=0,10S$
- pour une éolienne bipale ou tripale, $s=0,04S$

Dans notre conception, nous avons l'empennage dont la surface est de $s = 0,04S$

Où S : la surface balayée par l'hélice avec :

$$S = \pi R^2 = 0,7853[m^2]$$

Et l'empennage est de :

$$s = 0,0314156[m^2] \quad (\text{Surface du gouvernail}).$$

6.1 Puissance recueillie sur l'empennage

Pour déterminer la puissance recueillie sur l'empennage, il faut calculer les valeurs suivantes :

La pression sur une surface plane :

$$p = 0,13.V^2 \quad (2.5.2)$$

La force exercée sur l'empennage :

$$F = p.S \quad (2.5.3)$$

La puissance recueillie est donc de :

$$P = F.V$$

6.1.1 . Puissance recueillie au démarrage : $V = 3[m/s]$

La pression sur une surface plane est de : $p = 0,13.V^2 = 1,17 [N/m^2]$

Et la force exercée sur celle-ci est de : $F = p.S = 1,17 \times 0,0314156 = 0,36756[N]$

Alors la puissance recueillie sur l'empennage est de :

$$P = F.V = 0,36756 \times 3 = 0,110268[W]$$

6.1.2 Puissance recueillie en régime nominal : $V = 6[m/s]$

La pression sur une surface plane est de : $p = 0,13.V^2 = 4,68 [N/m^2]$

Et la force exercée sur celle-ci est de : $F = p.S = 4,68 \times 0,0314156 = 0,147025[N]$

Alors la puissance recueillie sur l'empennage est de :

$$P = F.V = 0,147025 \times 6 = 0,88215[W]$$

Chapitre 6. DIMENSIONNEMENT DES DIFFERENTES PIECES DE L'AEROGENERATEUR

1. Dimensionnement des éléments du moyeu

1.1 Axe de la pale

1.1.1 Fixation

Les pales sont fixées chacune sur un axe à l'aide des boulonneries, dont le diamètre et les nombres sont déterminés à partir de l'effort qu'ils subissent à la rotation des pales avec une vitesse du vent à la tempête $V = 40$ [m/s] pour qu'elles résistent bien à tout régime. Les vis sont sollicitées à un cisaillement pur. Cet effort est F_{cp} qu'on peut déterminer par la relation suivante :

$$F_{cp} = rm\omega^2 \quad (2.6.1)$$

Avec, F_{cp} : la force centrifuge de la pale par la masse due à la rotation ;

m : la masse de la pale ; $m = 0,5$ kg

w : la vitesse angulaire de l'hélice ;

r : la distance du point d'application de F_{cp} par rapport à l'axe de rotation ;

1.1.2 . Calcul de la force centrifuge

La distance du point d'application de la force par rapport à l'axe de rotation est :

$$r = 0,091 + 0,01 = 0,101 \text{ m}$$

La vitesse angulaire a pour expression :

$$\omega = \frac{2\lambda_0 V}{D} \quad (2.6.2)$$

$$\omega = \frac{2\lambda_0 V}{D} = \frac{2 \times 4 \times 40}{1} = 320 \text{ [rad/s]}$$

soit :

$$\omega = 320 \text{ [rad/s]}$$

La force centrifuge sera :

$$\begin{aligned} F_{cp} &= rm\omega^2 \\ &= 0,101 \times 0,5 \times 320^2 = 5171,2 \text{ [N]} \end{aligned} \quad (2.6.3)$$

soit :

$$F_{cp} = 5171 \text{ [N]}$$

1.1.3 . Matériau constitutif de la vis

Les vis sont en acier d'usage général dont les caractéristiques sont les suivantes :

Désignation : A33 à A50

Pour notre cas nous avons choisi l'acier A37 avec une contrainte admissible au cisaillement

$$\tau_{adm} = 30 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

1.1.4 . Détermination des dimensions de la vis de fixation

D'après la condition de résistance du matériau, la contrainte de travail doit être inférieure ou égale à la contrainte admissible : où

$$\tau_{\max} \leq \tau_{adm} \quad (2.6.4)$$

Ce qui nous donne la relation :

$$\tau_{\max} = \frac{F_{cp}}{S_{t_v}} = \frac{4F_{cp}}{n_v \pi d_v^2} \leq \tau_{adm} \quad (2.6.5)$$

Avec : S_{t_v} : la surface totale des vis de fixation de la pale [mm²] ;

n_v : le nombre de vis pour la fixation Dans notre cas on utilise $n_v = 4$

Finalement l'expression du diamètre de la vis sera :

$$d_v \geq \sqrt{\frac{4F_{cp}}{n_v \pi \tau_{adm}}} \quad (2.6.6)$$

$$AN : d_v \geq \sqrt{\frac{4 \times 5171}{4 \times \pi \times 30}} = 7,40 \text{ mm}$$

Suivant la norme on choisit la vis M8, et pour la fixation de la pale on utilise 4vis HM8

2. Multiplicateur

La vitesse de rotation de rotor de l'aéromoteur ne peut pas atteindre la vitesse nominale utile à l'entrée de l'alternateur, pour produire de l'énergie, même en régime au-delà du régime nominal. Or pour le cas à Madagascar, la moyenne de la vitesse du vent ne dépasse pas de 6 m/s. Alors il est indispensable de disposer d'un dispositif de multiplication de vitesse et assurer la transmission de puissance. Pour cela, le rapport de multiplication est de $i = 1/4$ et la transmission de puissance utilisée est les poulies courroies.

Le rapport de multiplication est noté par la lettre i qui doit être inférieure à 1 où $i < 1$.

Ce rapport est obtenu par la relation suivante :

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.6.7)$$

Où n_1 : la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne ou aussi la vitesse de rotation à l'entrée du multiplicateur.

n_2 : la vitesse de rotation à la sortie du multiplicateur.

A partir de cette relation, on peut tirer la valeur de la vitesse de rotation $n_2 = \frac{n_1}{i}$

Le schéma simplifié de la multiplication est donné par la figure suivante :

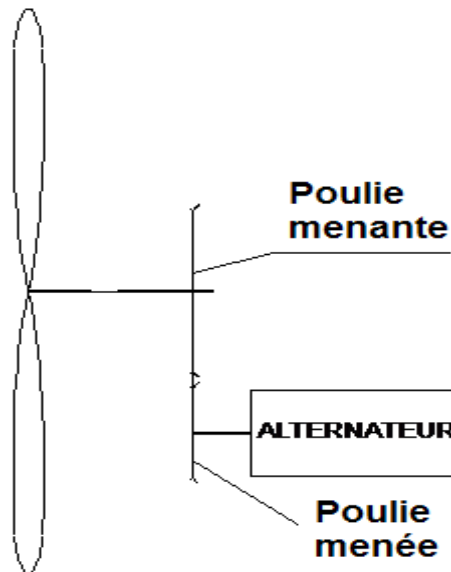


Figure 19: Schéma de principe du multiplicateur

2.1 Dimensionnement des poulies courroies

Pour la multiplication on propose d'utiliser une transmission de puissance par poulies courroies, dont la section de la courroie utilisée est trapézoïdale.

les caractéristiques du rotor en régime nominal

La vitesse de rotation avec un vent à vitesse nominale : $V = 6$ [m/s]

$$n_1 = 458 \text{ [tr/min]}$$

La vitesse angulaire : $w_1 = 48$ [rad/s]

Le couple : $M_{t1} = 1,836088251$ [Nm]

La puissance recueillie au niveau du rotor : $P = 35$ [W]

2.1.2 Calcul de la vitesse de rotation n_2

n_2 est la vitesse de rotation de la poulie menée qui peut être calculée par la relation suivante suivie de sa valeur numérique :

$$n_2 = \frac{n_1}{i} = 458 \times 4 = 1832 \text{ [tr/min]}$$

donc :

$$n_2 = 1832 [tr/min]$$

2.1.3 Les diamètres primitifs

Par définition, le rapport de multiplication est déterminé par la relation suivante :

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{dp_2}{dp_1} \quad (2.6.8)$$

, où

dp_2 : le diamètre primitif de la poulie 2

dp_1 : le diamètre primitif de la poulie 1

2.1.4 Choix du profil de la courroie

Le profil utilisé est choisi suivant le diagramme des profils de la courroie trapézoïdale (profil normal).

Le compatible à ces paramètres est le profil 10'' :

Avec : - le diamètre de la poulie 2 est $dp_2 = 50mm$

- le diamètre de la poulie 1 est

$$dp_1 = \frac{dp_2}{i} = 50 \times 4 = 200mm$$

d'où

$$dp_1 = 200mm$$

2.1.5 Entraxe

C'est la distance entre l'axe de la poulie 1 et celui de la poulie 2, on peut le déterminer par la relation suivante :

$$a_c = 0,7 \div 2,0 (dp_1 + dp_2) \quad (2.6.9)$$

D'où

$$a_c = 1 \times (200 + 50) \cong 250mm$$

$$a_c = 250\text{mm}$$

2.1.6 Longueur de la courroie

Qui peut être déterminée par la relation suivante :

$$L_c = 2a_c + 1,57(dp_1 + dp_2) + \left(\frac{dp_1 - dp_2}{4a_c} \right)^2 \quad (2.6.10)$$

Après calcul, on trouve : $L_c = 893\text{mm}$

2.1.7 Augmentation ou diminution de l'entraxe

En cas de l'existence du montage du tendeur de courroie, il est nécessaire de calculer des décalages de l'entraxe qui sont x et y suivant cette figure :

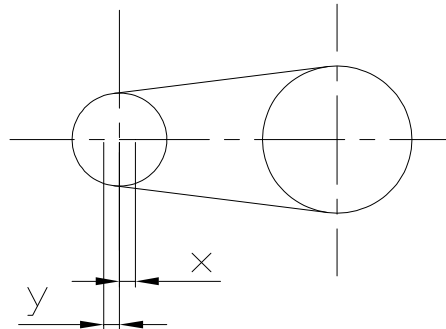


Figure 20: Décalages de l'entraxe

$$x \geq 0,03L_c = 0,03 \times 893 = 26,79\text{mm} \cong 27\text{mm}$$

$$y \geq 0,015L_c = 0,015 \times 893 = 13,39\text{mm}; \text{ soit } y = 13,5\text{mm}$$

2.1.8 Vitesse de la courroie

La vitesse de la courroie est déterminée par la relation suivante avec l'application numérique :

$$v = \frac{dp_1 \times n_1 \times \pi}{60 \times 1000} \quad (2.6.11)$$

AN :

$$v = \frac{dp_1 \times n_1 \times \pi}{60 \times 1000} = \frac{200 \times 458 \times \pi}{60 \times 1000} = 5,078 [m/s]$$

d'où sa valeur est de $v = 5[m/s] < v_{adm} = 30[m/s]$

2.1.8 Fréquence de flexion : f_B

On peut calculer la fréquence de flexion comme on vient de procéder ci après :

$$f_B = \frac{2 \times 1000 \times V}{L_c} \quad (2.6.12)$$

$$\text{AN : } f_B = \frac{2 \times 1000 \times V}{L_c} = \frac{2000 \times 5}{893} = 11,19 \left[s^{-1} \right]$$

Alors: $f_B = 11,19[s^{-1}] < f_{B,adm} = 40[s^{-1}]$

3. CARTER- COUVERCLE

3.1 *Carter couvercle du multiplicateur*

Le multiplicateur doit être logé dans une boîte en deux parties qui sont serrées par des vis intercalées d'une matière composite (joint d'étanchéité) :

La partie inférieure est appelée : carter

La partie supérieure : le couvercle

3.2 *Rôles du carter couvercle*

Le carter couvercle permet :

- D'assurer l'étanchéité, pour protéger la graisse contre les poussières et contre d'autres facteurs nuisibles.
- De mieux positionner l'emplacement des éléments de transmission, tel que : guidage en rotation, blocage en translation.
- De conserver les graisses pour la lubrification des éléments de transmission.
- De faciliter le remplacement des lubrifiants (cas de vidange).

Mais pour que les conditions soient remplies, il est conseillé de procéder les calculs suivants, pour le dimensionnement. Tous les paramètres à calculer sont tous fonction de l'entraxe de fonctionnement, qui est déjà calculé au paragraphe précédent, où $a_c = 250\text{mm}$.

3.3 Fixation du carter

3.3.1. Le diamètre de vis de fixation : d_v

Le diamètre de la vis pour la fixation est de :

$$d_v = 12\text{mm ou vis M12}$$

3.3.2. Hauteur du bossage par rapport à la base : δ_6

$$\delta_6 = 2d_v = 2 \times 12 = 24\text{mm}$$

Soit : $\delta_6 = 24\text{mm}$

3.3.3. Le diamètre de vis de serrage carter couvercle : d_{v2}

$$d_{v2} = 0,6d_v = 7,2\text{mm}$$

Alors, on va utiliser des vis M8

$$d_{v1} = 0,8d_v = 9,6\text{mm}$$

On va utiliser des vis M10

3.3.4. Couvercle de la nacelle

Le couvercle de l'ensemble (multiplicateur et alternateur) est confectionné avec des fers plats 15 x 2,5 et de tôle TPG 10/10ème.

Le couvercle est divisé en plusieurs tronçons pour raison de montage et de démontage.

4 EMPENNAGE

4.1 Dispositif d'orientation

Les aéromoteurs à axe horizontal nécessitent une orientation permanente de la machine dans une direction parallèle à la direction du vent pour minimiser les contraintes et les pertes de puissance.

Il existe plusieurs dispositifs d'orientation, généralement choisis en fonction de la puissance de la machine. Ils prennent une part importante dans le bon fonctionnement de la machine.

Les changements de direction et les variations de fréquence de rotation liées aux rafales sont à l'origine de vibrations néfastes au bon fonctionnement de la machine.

Le dispositif d'orientation devra donc réaliser un compromis entre la nécessité de maintenir le rotor face au vent sans provoquer lors des changements brusques de direction du vent des variations d'orientation rapides de la machine.

Les plus utilisées sont :

- ✓ l'empennage ;
- ✓ l'éolienne auxiliaire,
- ✓ l'éolienne en aval du support,
- ✓ les dispositifs à servo-moteur ;
- ✓ les dispositifs manuels

Pour notre cas le mieux adapté est l'empennage par raison économique et facilité de fabrication.

La figure ci-dessous nous montre le système :

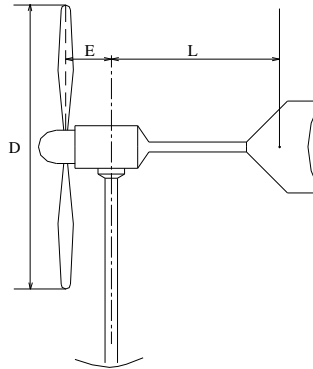


Figure 21: L'empennage.

4.2 Calcul de la surface du gouvernail

L'empennage sert à pivoter le système éolien à l'aide d'un gouvernail. En principe, il est possible pour les éoliennes dont le diamètre est inférieur à 6m.

On désigne par E la distance qui sépare l'axe de la pale et celui du pivot, et par L : la distance qui sépare l'axe du pivot et la direction du centre de gravité de l'empennage.

La longueur L doit être 4 fois de la valeur de la distance E où :

$$L = 4.E \quad (2.6.13)$$

La surface du gouvernail est donnée par la relation suivante :

$$S_e = 0,04S \quad (2.6.14)$$

Où ; S : la surface balayée par la pale ; dont sa valeur est la suivante :

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 1^2}{4} = 0,78539[m^2]$$

Alors S_e a donc pour valeur :

$$S_e = 0,04S = 0,0314156[m^2] = 31415[mm^2]$$

4.3 Calcul des coordonnées du centre de gravité du gouvernail

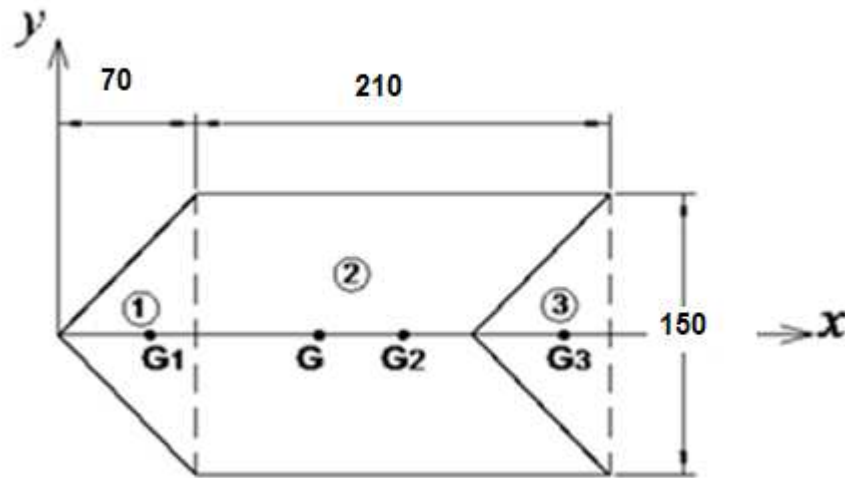


Figure 22: Position du centre de gravité du gouvernail

Le système gouvernail est formé par l'ensemble de 2 surfaces ① et ② et retranché de la surface ③.

Le centre de gravité du gouvernail a pour coordonnées G (X_G , Y_G)

Avec Y_G : son ordonnée dont sa valeur est 0 car le système est symétrique par rapport à l'axe des x

X_G : son abscisse qui est déterminé par la relation suivante :

$$X_G = \frac{\sum x_{G_i} \cdot S_i}{\sum S_i} = \frac{x_{G1} \cdot S_1 + x_{G2} \cdot S_2 - x_{G3} \cdot S_3}{S_e} \quad (2.6.15)$$

Où x_{G1} : l'abscisse du centre de gravité de la surface ①, qui est égale à :

$$x_{G1} = \frac{2}{3} \times 70 = 46,66 [mm]$$

Et sa surface

$$S_1 = \frac{150 \times 70}{2} = 5250 [mm^2]$$

X_{G2} : l'abscisse du centre de gravité de la surface ②, qui est égale à :

$$x_{G2} = 70 + \frac{210}{2} = 175 [mm]$$

Et sa surface

$$S_2 = 210 \times 150 = 31500 [mm^2]$$

x_{G3} : l'abscisse du centre de gravité de la surface③, qui est égale à :

$$x_{G3} = 70 + 210 - \frac{70}{3} = 256,56 [mm]$$

Et sa surface

$$S_3 = \frac{150 \times 70}{2} = 5250 [mm^2]$$

Et la surface de l'empennage ou surface du gouvernail est de :

$$S_e = 31500 [mm^2]$$

Le tableau suivant nous montre le calcul :

Tableau 10: Tableau de calcul du centre de gravité du gouvernail

N° du solide	$X_{Gi} [mm]$	$S_i [mm^2]$	$X_{Gi} * S_i [mm^3]$	$\sum S_i$	$\sum X_{Gi} * S_i$	$X_G [mm]$
1	46,66	5250	244965	42000	4410525	105,0125
2	175	31500	5512500			
3	256,56	5250	1346940			

D'après le tableau les coordonnées du centre de gravité du gouvernail est donc :

$$G = (x_G = 105 ; y_G = 0)$$

4.4 Confection du gouvernail

Le gouvernail est confectionné à l'aide des profilés par exemple fer cornière L20, L15 et fer T15) et de tôle TPN40/100ème.

Les fers cornières sont fixés au plateau principal. Ensuite, ils sont soudés bout à bout, tout au long du gouvernail pour avoir la rigidité de l'ensemble. La tôle est façonnée sous la forme comme montre la figure ci après.

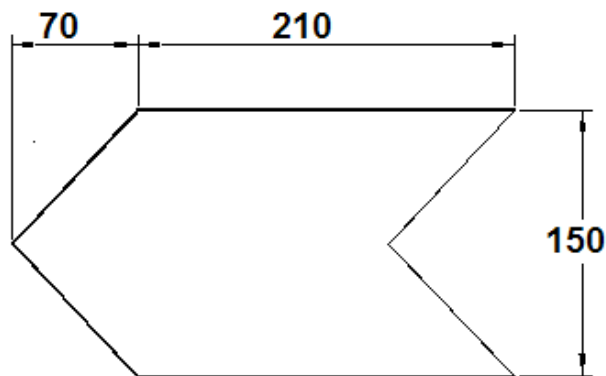


Figure 23: Forme du gouvernail

5. PLATEAU

Le plateau est un élément sur lequel les autres éléments (multiplicateur, alternateur, gouvernail), sont posés pour les réunir qui fixé sur le sous plateau lié à l'axe du pivot, il est muni des trous pour la fixation des éléments qu'on vient d'énumérer ci-dessus:

- ✚ Trous pour la fixation du carter du multiplicateur par 4 boulons H M12 40-20.
- ✚ Trous pour la fixation de l'alternateur par 4 boulons H M12 40-20.
- ✚ Trous destinés pour la fixation des couvercles du système.

Les trous pour la fixation du sous plateau coïncident avec les ceux du carter de multiplication pour faciliter le serrage.

Matériau : acier XC 32 d'épaisseur 8[mm]

6. ALTERNATEUR

6.1 Caractéristiques

6.1.1 Définition

C'est l'ensemble de courbes et valeurs numériques qui déterminent les variations, limites, plages et possibilités de réglage, fonctionnement et utilisation de l'alternateur.

6.1.2 Caractéristiques de base

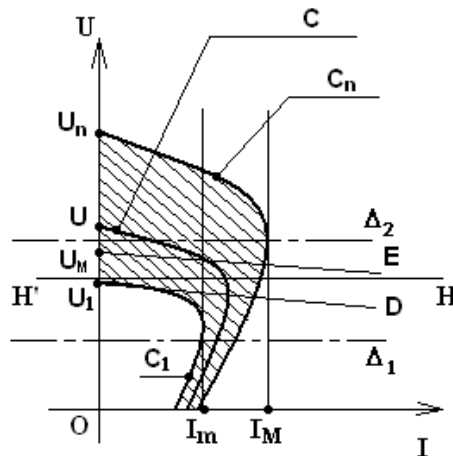


Figure 24: Caractéristiques de base

$$|U = f(I)|$$

Variation de U en fonction de I.

- U et I étant ondulées, il s'agit de leurs valeurs efficaces ou moyennes.

Une seule courbe (C_1, C_2, C_3, \dots) pour chaque vitesse de rotation du rotor (N_1, N_2, N_3, \dots) comprise entre N maxi et N mini (qui donne N nominale à vide).

L'ensemble (faisceau) des courbes $C_1, C_2, C_3, \dots, C_i \dots C_n$ forme une nappe (zone hachurée) relativement aplatie verticalement (I limitée par l'augmentation de N et f).

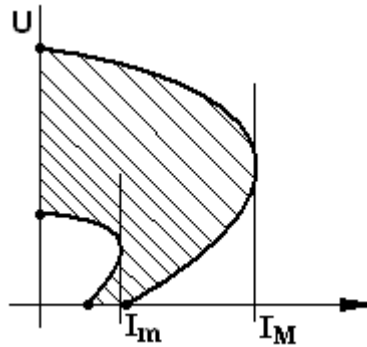


Figure 25: Nappe formée par la faisceau des courbes

Nappe (plus éloignée) relative à une dynamo. La plage de variation des I maxima comprises entre I mini et I maxi est étroite (bande I_{mABUM}), (auto-limitation de I). Le régulateur de tension détermine une plage des tensions (bande U_{1DEUM}).

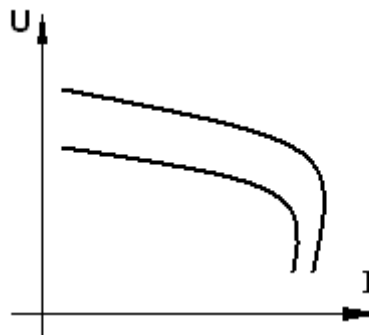


Figure 26: Tension en fonction de courant

Pratiquement ; la partie graphique intéressante (Figure 24) (fournie de plus souvent par les constructeurs) est comprise entre les droites $\Delta 1$ et $\Delta 2$.

Valeurs de U_M (selon voltage de la batterie) $\approx 12V$ (ou $24V$) + $2V$.

Valeurs de I (selon N et type de batterie) : $10A$ à $80A$.

6.1.3 Caractéristiques de charge

Tension à vide (pour $I = 0$)

$$U = f(N)$$

Variation de U en fonction de N .

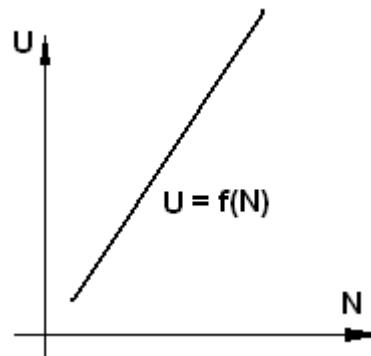


Figure 27: Caractéristiques de charge

Les différentes valeurs de U correspondent à celles que l'on relève sur la courbe $U = f(I)$, à l'intersection de l'axe OU et des courbes C .

Remarque : il faut éviter un fonctionnement à vide prolongé ou fréquent (détérioration possible de l'inducteur survolté).

- Intensité à tension constante :

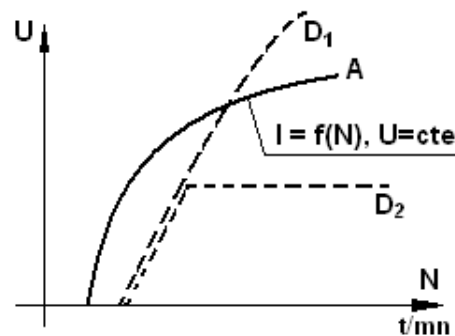


Figure 28: Tension en fonction du régime

- Courbes de plein champ (sans le régulateur). $U = f(I)$
- Pour une même tension donnée U , à chaque valeur de N correspond une valeur de I .

Les différentes valeurs de I sont relevées sur l'axe OI et correspondent aux intersections d'une droite horizontale $H'H$ avec les courbes C_1, C_2, C_3, \dots . Pour un

alternateur : courbe A. Pour une dynamo : courbe D₁ et courbe D2 (sans et avec régulation de I).

- Effet de la température (t) : (alternateur placé sous le capot du moteur). I diminue si la température augmente.
 - Théoriquement ; plusieurs courbes pour les températures différentes.
 - Pratiquement ; trois courbes, à froid (F), normale (N), à chaud (C).

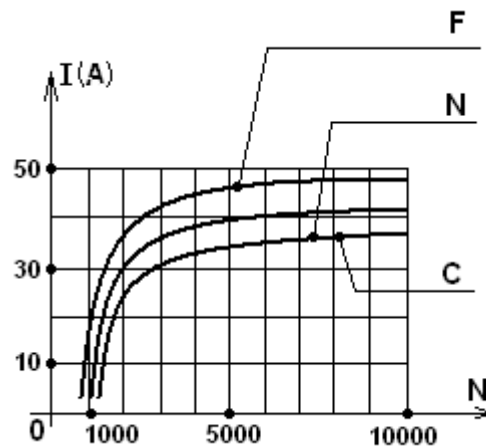


Figure 29: Effet de la température

Au ralenti : graphiques plus précis pour permettre d'apprécier la charge aux faibles vitesses N.

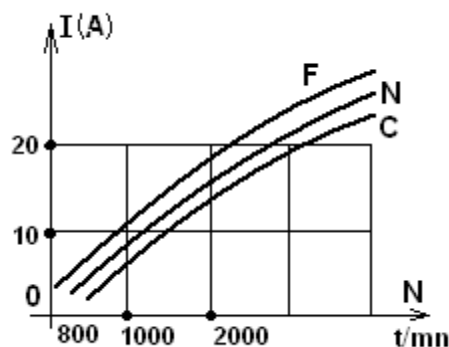


Figure 30: Charge à faible vitesse

6.1.4 Caractéristiques numériques

➤ Caractéristiques mécaniques et électriques

Pour notre cas, on utilise un Alternateur Valeo dont les caractéristiques sont les suivantes :

Tension (pour batterie 12V) = 14V.

Intensité nominale (sous 14 V) = 20A.

Vitesse pour 20A = 1500[tr/min]

I_{\max} (sous 14V) = 25A.

Vitesse maxi = 5000[tr/min].

Puissance nominale = 350W.

Nombre de pôles = 12.

Résistance ohmique du rotor = 7Ω .

➤ Autres valeurs

Poids = 4 à 8 kg

Vitesse de conjonction (début de charge) = 800 à 1000[tr/min].

Puissance mécanique absorbée = 1 800W (\cong 2,5 ch).

Débit à froid 33A à 28V (pour batterie de 24V).

Débit à chaud = 31A.

Partie III. REALISATION ET EVALUATION ECONOMIQUE

Chapitre 1. REALISATION

Connaissant les paramètres de base pour la confection, nous pouvons enfin introduire à la réalisation de la machine. La figure ci-dessous nous montre une vue d'ensemble de l'éolienne.

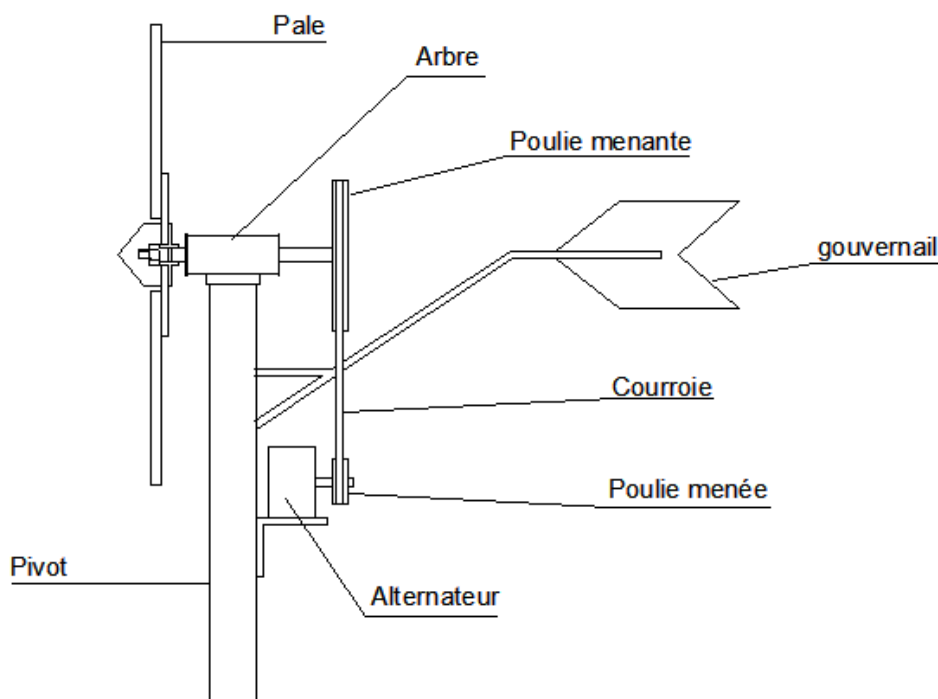


Figure 31: Vue d'ensemble

1 HELICE : façonnage

Il faut apporter un grand soin dans la construction de l'hélice, car c'est elle qui fera tout le travail ; il est indispensable qu'elle soit bien usinée et bien équilibrée, en poids comme en direction. Il faut absolument que toutes les pales passent par la même place, car une erreur de plus de 5 mm pourrait entraîner des vibrations. Au-delà d'une certaine vitesse, il y a des risques sérieux de détérioration (ruptures de pales, etc.).

L'hélice doit être construite en bois pas trop lourd (sapin, hêtre...). Il faut choisir un bois sans nœud et sans fêlure, d'une épaisseur de 30 mm.

Après le choix de la dimension des pales, la planche sera rabotée à la machine, afin d'obtenir une épaisseur bien continue sur toutes les pales : environ 25 mm. Après raboter celle-ci à la main pour lui donner un certain vrillage.



Photo 1: Une pale

Les pales terminées, il faudra les monter sur les supports de pales. Ceux-ci ne devront être boulonnés et soudés qu'au dernier moment sur le moyeu, car il est impossible d'ajuster les pales à 120° les unes par rapport aux autres sans les avoir préalablement emmanchées. Il faut d'abord les boulonner sur le moyeu, lequel doit être monté sur son arbre pour pouvoir tourner.

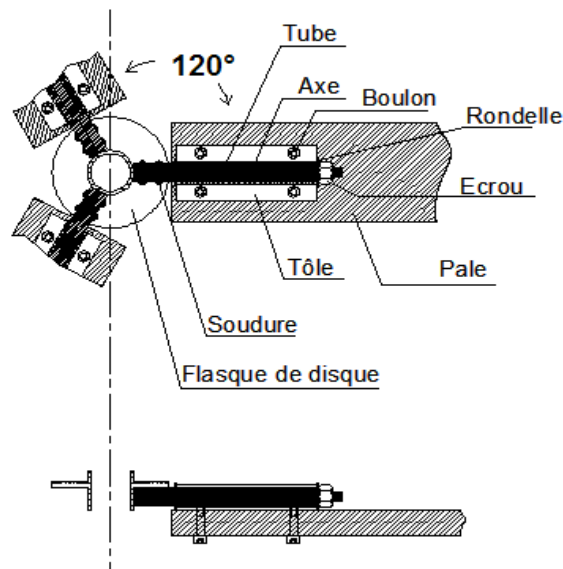


Figure 32: Fixation de la pale

2. L'ARBRE

L'arbre est soutenu par un tube qui porte à son extrémité le roulement. Le détail du roulement à l'extrémité du tube avec son porte roulement rapporté et soudé est représenté par la figure ci-dessous :

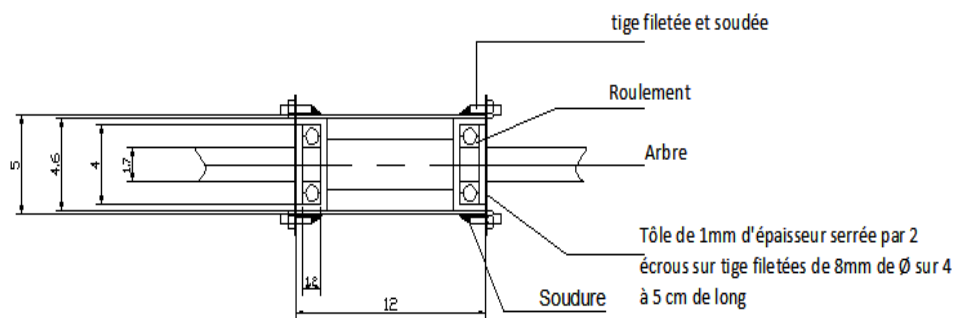


Figure 33: Arbre et tube avec son porte roulement

3. MULTIPLICATEUR

Le rotor tourne à vide sans charge à 458 tours/mn à une vitesse de vent 6m/s. Cela implique un multiplicateur qui est nécessaire pour notre alternateur. Pour cela, nous avons besoin d'un rapport de multiplication $\frac{1}{4}$ pour avoir une vitesse de rotation de l'alternateur égale à 1500 tours/mn, perte comprise.



Photo 2: Poulie menante pour la multiplication

4. BATTERIES

Une batterie transforme l'énergie électrique en énergie chimique stockable, pour la restituer sous forme de courant électrique, avec un rendement de près de 80%.

Si l'on veut utiliser un stockage pour batteries, il faudra d'abord déterminer la capacité de celles-ci en fonction du nombre maximum de jours sans vent et des besoins quotidiens.

La capacité de la batterie s'exprime en kWh ou en ampère/heure (Ah). La capacité en kWh sera égale à celle en Ampère multipliée par la différence de potentiel aux bornes de la batterie exprimée en volt, celle-ci est pratiquement constante.

Par exemple : courant 12 volts, 50 ampères ; $P = 600$ watts, soit 0,6 kWh.

5. DISPOSITIF DE CONTROLE

Pour éviter les courants de charge trop intenses, on placera un disjoncteur après le redresseur, si l'éolienne fournit du courant alternatif.

6. UTILISATION

On peut adopter deux solutions. La première est de garder le courant continu qui sort de la batterie (12, 24 ou 36 volts) ce qui oblige à avoir toute son installation équipée de moteurs en continu, de tubes fluorescents spéciaux. On peut aussi transformer le courant continu en courant alternatif similaire à celui du réseau JIRAMA., à l'aide d'un convertisseur.

L'avantage de la seconde solution est de diminuer la capacité de stockage afin de permettre l'utilisation d'un équipement électrique standard.

7. ESSAIS

Essai N°1

Site : Colline de Vontovorona

Date : 25/02/09

Matériel : chronomètre

Le résultat obtenu durant cette journée est illustré par le tableau suivant :

N°	horaire	Nombre moyenne de tour de l'hélice pendant 3mn	Vitesse de rotation de l'hélice (trs/mn)
1	07h-08h	891	297
2	08h-09h	840	280
3	09h-10h	1215	405
4	11h-12h	1890	630
5	13h-14h	1446	482
6	14h-15h	1590	530
6	15h-16h	1353	451
7	17h	936	312

Essai N°2

Site : Colline de Vontovorona

Date : 26/02/09

Matériel : chronomètre

Le résultat obtenu pour cette deuxième journée est illustré par le tableau suivant :

N°	horaire	Nombre moyenne de tour de l'hélice pendant 3mn	Vitesse de rotation de l'hélice (trs/mn)
1	07h-08h	330	110
2	08h-09h	762	254
3	09h-10h	1356	452
4	11h-12h	1809	603
5	13h-14h	1446	482
6	15h-16h	1530	510
7	17h	1290	430

Interprétation

D'après ces résultats, la moyenne de la vitesse de rotation de l'hélice est de 412tours/mn, ce qui va nous donner une vitesse de 1648 tours/mn après multiplication. Cette valeur est satisfaisante pour notre alternateur qui demande une vitesse de rotation de 1500tours/mn.

Chapitre 2. EVALUATION ECONOMIQUE

L'objectif de cette étude est d'assurer la rentabilité ou la faisabilité du projet « implantation d'un mini-aérogénérateur ». Pour cela, il est nécessaire de calculer différents paramètres tels que les dépenses d'investissement, les coûts opératoires et les dépenses d'exploitation.

1 Devis estimatif et quantitatif du projet

Comme il s'agit d'une éolienne domestique, produisant de l'énergie électrique, les fournitures de l'installation sont donc évaluées par le tableau récapitulatif suivant :

Tableau 11:Devis estimatif et quantitatif du projet

N°	DESIGNATION	U	QUANTITE	MONTANT(en Ar)
1	CONFECTION DE LA PALE	fft	3	10 000
2	VISSERIE	nb	30	10 000
3	TOLES			
	TPG 10/100è (1000x1000)	feuille	1	8 500
4	ROULEMENTS	nb	4	12 000
5	POULIES -COURROIES	nb	1	9 000
6	JOINT D'INTANCHEITE	fft	5	6 400
7	ALTERNATEUR VALEO	fft	1	100 000
8	ACIER COURANT			
	Tube galvanisé Ø50	m	1	10 000
	Tube galvanisé Ø20	m	0,5	2 000
	Fer AE XC E26 Ø25	m	1	16 000
	Acier Béton Ø16	m	0,5	10 000
	Fer cornière L35	barre	0,5	3 500
9	Palier	nb	2	40 000
10	RESSORTS HELICOÏDAL	nb	1	3 000
11	CARTER -COUVERCLE	fft	1	10 000
12	CONVERTISSEUR	nb	1	120 000
13	BATTERIE	nb	1	60 000
12	Matière première pour usinage			10 000
13	MOYEU	nb	1	5 000
COUT TOTAL (TTC)				445 0

2. Coût de l'équipement principal :

Le matériel comprend tous les équipages de l'aérogénérateur, nous avons évalué le matériel sur un an de fonctionnement. Celui-ci est présenté par le tableau de devis estimatif et quantitatif du projet.

Ce coût est de $I_0 = 265\,400$ Ar

3. Estimation des autres investissements :

Les différents autres coûts des investissements en limite des unités de fabrication peuvent être estimés à partir du coût du matériel principal.

L'estimation de ces différents coûts est représentée par le tableau suivant :

Tableau 12: Estimation des différents coûts

Catégorie	Pourcentage de coût principal	Prix total en Ar
imprévus	30	133 620
Installations générales	10	44 540
Total I_1		1780

4. L'investissement total du projet :

Le total de l'investissement est la somme des deux qu'on vient de calculer précédemment :

$$I_t = I_0 + I_1 = 443\,560 \text{ Ar}$$

5. Calcul du flux net de trésorerie (FNT) ou cash flow

Par définition, les FNT ou Cash – flow sont les bénéfices nets acquises sur un projet pendant sa durée de vie. On estime une durée de vie de 10 ans pour un aérogénérateur et considérons que le système, en général a besoin de maintenance dont on a estimé à 10% de l'investissement total.

5.1 Calcul du gain énergétique équivalent en électricité en une journée

D'après ce qu'on a vu, la puissance de l'alternateur est de 350W, alors il fournit de l'énergie électrique 0,35[kWh] en une heure de bon fonctionnement.

Durée de fonctionnement pour une journée : 10 à 12 heures/jour

$$E = 0,35 \times 10 = 3,5[kWh]$$

Où le gain d'électricité par jour est de 3,5[kWh]

5.2 Le coût économisé par jour d'électricité :

Le prix du kW de l'énergie électrique actuel (Février 2009) s'élève à Ar 265, ce qui correspond à un gain de

$$3,5 \times 265 = 928 \text{ Ariary} .$$

Soit un bénéfice annuel de $928 \times 365 = 338720 \text{ Ariary}$

On adopte un amortissement linéaire et une valeur du taux sur les bénéfices de 30 % pour cette étude.

Nous aurons comme amortissement

$$\frac{I_t}{10} = \frac{443560}{10} = 44356 \text{ Ar} .$$

En bref, nous pouvons donc établir l'échéancier suivant :

- Durée de vie : 10 ans
- Valeur de revente à la 10ème année : nulle
- Bénéfice : 338 720 Ar
- Charges : $338\,720 \times 20\% = 67744 \text{ Ar}$ (bénéfice x 20%)

- L'amortissement linéaire : 44 356 Ar;

- Impôt sur les bénéfices : 30 %

Les FNT seront évalués d'après ce bilan par le tableau ci-dessous

Tableau 13: Calcul des FNT

Année	1	2	...	14	15
(1) : Recettes	338 720	338 720	...	338 720	338 720
(2) : Charge = (1) x 0,2	67744	67744	...	67744	67744
(3) : Dotation aux amortissements = $I_t/10$	44356	44356	...	44356	44356
(4) : Résultat d'exploitation avant amortissement = (1) - (2)	290976	290976	...	290976	290976
(5) : Résultat d'exploitation Après amortissement = (4) - (3)	226620	226620	...	226620	226620
(6) : IBS = (5) x 0,3	67986	67986	...	67986	67986
(7) : FNT = (1) - [(2) +(6)]	202990	202990	...	202990	202990

6. Calcul de la valeur actuelle nette (van) et taux de rentabilité interne (TRI)

La VAN ou Discounted Cash-flow est la somme des revenus annuels actualisés, calculée pendant toute la durée de vie de l'investissement sur le montant du capital investi (CA).

Comme les valeurs des flux nets de trésoreries sont constantes pendant la période de fonctionnement de l'éolienne, on peut donc pour la suite de l'étude procéder par des progressions géométriques.

$$\Rightarrow VAN = \sum FNT - CA \quad (3.2.1)$$

Cette valeur varie en fonction du taux d'actualisation. Quand ce dernier augmente, la VAN augmente aussi.

Le Taux de Rentabilité Interne ou (TRI) est égal à la valeur du taux d'actualisation pour lequel la VAN s'annule. C'est aussi le taux d'intérêt maximum auquel on pourra accepter pour financer l'investissement du projet.

Supposons que le prix du kWh d'électricité de la JIRAMA subit une augmentation de 2% chaque année.

6.1 Calcul de la VAN à 15% :

En posant

$$X = \frac{1+0,02}{1+0,15} = 0,887$$

$$VAN = \sum FNT - CA = 202990 \times \frac{1-X^{15}}{1-X} - 443\,560$$

$$VAN = 1055473 \text{ Ariary}$$

6.2 Calcul de la VAN à 20% :

$$X = \frac{1+0,02}{1+0,2} = 0,85$$

$$VAN = 791493 \text{ Ariary}$$

Détermination du TRI :

La VAN s'annule donc pour un taux d'actualisation compris entre 15 % et 20 %

$$\Rightarrow 15 \% < TRI < 20 \%$$

Par interpolation :

$$TRI = 20 - 5 \times \frac{0 + 1055473}{791493 + 1055473}$$
$$TRI = 17,14268427 \% > 15\%$$

7. Détermination du temps de remboursement ou POT

(Pay Out Time)

C'est le temps correspondant à la durée d'exploitation nécessaire pour récupérer le montant de l'investissement. Il est défini par la formule :

$$FNT \times POT = I_t$$

$$\Rightarrow POT = \frac{I_t}{FNT} \quad (3.2.2)$$

$$POT = \frac{443560}{202990} = 2,185 \text{ ans}$$

$$POT = 2,185 \text{ ans} \approx 2 \text{ ans } 2 \text{ mois } 6 \text{ jours}$$

Le temps de retour de l'investissement est de 2,185 ans pour une durée de vie de 10ans, de plus le taux de rentabilité interne est de 17,142% > 15%. Alors le projet d'installation de notre éolienne est rentable.

CONCLUSION

Actuellement, l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution mondiale d'hydrocarbures, la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité. Son exploitation peut s'avère très rentable dans les régions ventées.

Comme le cas de Madagascar où 68% du territoire Malgache ont la vitesse du vent qui dépasse le 3,5m/s.

Il importe donc de vulgariser dans notre pays cette technologie qui nous permet de combattre la pollution et d'éliminer l'excès des gaz carboniques dans l'air qui sont les premiers facteurs de la destruction de la couche d'ozone.

L'exploitation de l'éolienne engage peut être un fond d'investissement onéreux pour sa construction mais présente beaucoup d'avantages quant à son exploitation propre.

Aucun cout de combustible ; aucun rejet toxique ou polluant ; faible coût d'amortissement, aucune surveillance de quart comme les centrales thermiques sauf en cas de survent. Aussi est elle plus recommandée devant les autres forme de producteurs d'énergies : thermique, nucléaire, hydraulique.

C'est La raison de notre choix, en étant que formé pour être des ingénieurs, de soutenir sa vulgarisation, point essentiel à notre mémoire de fin d'étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : A. Chevalier – guide du dessinateur Industriel – Edition hachette
- [2] : A. TOUSSAINT ; Herman – Théorie et calcul aérodynamique des hélices – Paris 1938
- [3] : BERNARD F.– Eléments de construction à l'usage de l'Ingénieur (organes de transmission) tome III,
- [4] : BERNARD F. – Eléments de construction à l'usage de l'Ingénieur (transmission des mouvements circulaires) tome IV
- [5] : Cours de M. RAKOTONINDRAINY – Gestion et économie minier
- [6] : Cours de M. RANAIVOSON Léon Felix – Energie
- [7] : BERNARD F – Eléments de construction à l'usage de l'Ingénieur (transformation du mouvement continu en rectiligne alternatif) tome V
- [8]: Désiré LE GOURIERES – ENERGIE EOLIENNE Théorie, conception et calcul pratique des installations – Edition EYROLLES 1935
- [9] : Energies renouvelables et développement rural en zones subaride - Séminaire du 28 Avril au 22 Mai 1981, à MONTPELLIER.
- [10] : Guy CUNTY, Edisud – « Eoliennes et aérogénérateurs » - Edition 1979
- [11] : G. Pissarenko, A. Yakoolev et V. Matveev – Aide mémoire de RDM – traduit du russe par SEGASAYO - Edition Mir Moscou
- [12] : Les éoliennes – Editions techniques et scientifiques français 1979.
- [10] : RANAIVOSOA Samuël– Les équipages mobiles d'un aérogénérateur – Mémoire de fin d'étude 2002
- [13] : Sedralahatra RAKOTONDRADALO MAHANDRIARIVELO – AEROGENERATEUR Etude aérodynamique et simulation sous visual basic – Mémoire de fin d'étude 2002
- [14] : W.A.M. Jansen et P .T.Smulders - Conception des pales des éoliennes à axe horizontale 1980

ANNEXES

ANNEXE I :

DONNEES METEOROLOGIQUES

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>ANTANANARIVO : 18°54'S ; 47°32'E 1310m</i>													
Température moyenne en ° C	20,9	21,1	20,5	19,5	17,2	15,4	14,7	14,9	16,7	18,8	20,4	20,8	
Durée d'insolation en heure et 1/10	203,6	206,8	203,4	236,1	233,1	210,1	213,9	230,9	254,1	276,4	226,7	198,7	
Vent max instantané en m/s VV	21	22	21	17	18	19	19	20	23	19	28	21	
DD					ESE	SE							
Température absolue Max	30,2	29,8	28,8	19,2	27,9	26,3	25	28	29,3	30,5	30,6	29,8	
Min	11,7	13	11,2	9,1	5,5	3,1	3,1	1,6	3	6	8,2	11,5	
Ecart moyen de température jour nuit	9	9,1	8,8	9,7	10,2	10,4	10	10,4	11,7	12,5	11,3	9,5	
Moyenne mensuelle et annuelle	7	6	7	6	6	7	7	7	7	7	7	6	7 km/h
Vitesse vent en km/h	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2 m/s
en m/s	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
Vent dominant	9	11	8	6	6	11	6	6	8	10	8	9	
Vent max horaire en m/s VV	W	W	W	W	W	W	ESE	ESE	NNW	W	W	W	
DD													
<i>TOLIARY : 23°23'S ; 43°44' E ; 8m</i>													
Température moyenne en ° C	27,4	27,5	26,8	25	22,5	20,7	20,2	21	22,3	23,8	25,2	26,5	
Durée d'insolation en heure et 1/10	299,4	281,5	292,7	298	306,3	275,6	295,2	311,2	310,7	331,7	312,3	311,1	
Vent max instantané en m/s VV	47	33	31	41	24	20	23	21	23	24	29	29	
DD	NE	SE	E	W	SSE	SWW	SW	E	SW	SW	S	ESE	
Température absolue Max	39,5	40,4	39	36,5	36,2	32,9	32,3	33,6	37,8	38,9	39,8	37,5	
Min	16	16,2	13,7	9,4	8,9	7	6,1	6,8	8	10	14,2	15,1	
Ecart moyen de température jour nuit	9,4	9,8	10,3	11,3	12,2	13,6	13,2	13,3	12,9	11,3	10,3	9,6	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	14	13	14	13	13	13	13	14	15	15	15	14	14 km/h
en m/s	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4 m/s
Vent dominant	SW	SW	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SW	
Vent max horaire en m/s VV	19	16	19	16	13	13	14	13	14	14	19	16	
DD	NNE	SE	E	W	SSE	SW	SW	SW	SW	SW	S	ESE	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
MAEVATANANA : 16°57'S ; 46°50' E ; 79m													
Température moyenne en ° C	27,9	28	28,1	28,3	27,1	25,4	25,1	26	27,5	29,1	29,4	28,5	
Durée d'insolation en heure et 1/10	216,5	207,1	227,9	284,5	283	287,5	292,5	311,1	304,1	287,5	269,6	209,8	
Vent max instantané en m/s VV	26	22	49	23	18	19	14	20	15	12	15	16	
DD	NE	S	NE	WSW		S	ESE	S	S	SSE	SSW	SW	
Température absolue Max	40	37,9	37,9	39,3	36,8	35,9	35	35,8	40,1	42,8	39,6	39,3	
Min	17	19	18,5	18,7	12,7	6,9	12,5	11	14,9	17	16,8	15,4	
Ecart moyen de température jour nuit	9,9	10,1	10,3	11,4	12,8	13,7	13,6	13,7	14	13,9	12,7	11,1	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	4	4	4	4	5	7	7	9	8	5	5	4	6 km/h
en m/s	1	1	1	1	1	2	2	3	2	1	1	1	2 m/s
Vent dominant	NW	NW	NW	NW	NW	SE	SE	SE	SE	SE	N	NW	
Vent max horaire en m/s VV	10	9	9	6	8	9	6	8	9	7	6	7	
DD	ENE	NNW	E	WSW	SE	S	ESE	S	S	SSE	SSW	NNE	
MAHANORO : 19°50'S ; 48°48' E ; 5m													
Température moyenne en ° C	26,1	26,1	25,6	24,7	22,8	21,2	20,5	20,6	21,4	22,7	24,2	25,4	
Durée d'insolation en heure et 1/10	229,3	209,5	194,3	202,3	194,9	172,6	166,6	187,9	220,8	235,5	212,7	203,2	
Vent max instantané en m/s VV	20	17	18	13	15	15	19	16	14	14	15	26	
DD	SW	E	SE	E	S	S	SSE	E	NE	NE	NE	S	
Température absolue Max	34,9	32,8	34,9	32,2	30,8	28,9	28,7	28,3	28,6	30	31,2	32,8	
Min	19,3	19,4	18	16,7	11,9	8,9	11,6	11,6	11	12	15,6	16	
Ecart moyen de température jour nuit	7,2	7,4	7	7,5	7,7	7,9	7,9	8,3	8,3	7,7	7,5	7,2	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	11	10	11	9	9	8	9	9	11	13	13	12	10 km/h
en m/s	3	3	3	2	2	2	2	2	3	4	4	3	3 m/s
Vent dominant	E	E	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	ENE	ENE	ENE	ENE	
Vent max horaire en m/s VV	11	10	11	9	9	11	11	9	9	11	10	13	
DD	SW	E	NE	E	S	SSE	SSE	NE	ENE	NE	NE	SSE	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>SAMBAVA : 14°17'S ; 50°10' E ; 5m</i>													
Température moyenne en ° C	26,7	26,8	26,8	26	24,6	23	22,3	22,2	22,8	23,8	25,2	26,2	
Durée d'insolation en heure et 1/10	22,9	236,1	227,1	220,6	220,5	200,2	193,2	197,5	222,4	240	235	242,2	
Vent max instantané en m/s VV	40	14	14	15	17	17	18	16	16	16	15	17	
DD	NNE	NNE	NE	ESE	SE	SSE	SSE	SSE	S	SE	ESE	SE	
Température absolue Max	35	35,2	35,2	34,8	33	31,9	30,5	30	31,9	32,4	33,9	33,6	
Min	18,6	16,3	16,7	16,4	13,9	12,7	13,1	12,5	12,6	14,3	15,5	17,3	
Ecart moyen de température jour nuit	8,9	9,2	8,9	8,8	9	9	8,9	8,8	9,3	9,4	9,1	8,9	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	10	9	10	11	12	13	15	16	15	14	11	9	12 km/h
en m/s	3	2	3	3	3	4	4	4	4	4	3	2	3 m/s
Vent dominant	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	
Vent max horaire en m/s VV	28	17	11	10	12	12	13	12	11	10	10	11	
DD	NNE	SSW	SE	SE	SSE	S	SSW	S	S	SE	ESE	SE	
<i>TOAMASINA : 18°07'S ; 49°24' E ; 6m</i>													
Température moyenne en ° C	26,3	26,4	25,9	24,5	23	21,5	20,7	20,7	21,4	22,7	24,6	25,7	
Durée d'insolation en heure et 1/10	228,7	209	191,2	199,7	201,6	171,2	172,2	183,6	217	249,1	242,2	228	
Vent max instantané en m/s VV	30	39	21	18	20	19	23	19	19	20	22	24	
DD	NE	NNW	SE	SSW	SE	SE	SE	SW	SW	SSE	SSE	S	
Température absolue Max	34,2	35,4	36	32,3	30,8	29	27,6	29,8	28,4	31,1	31,4	35,1	
Min	19,9	20	19,2	17,4	14,9	11,3	12,6	12,5	13	14,4	16,3	17,2	
Ecart moyen de température jour nuit	7,4	7,3	6,7	6,4	7,4	7,5	7,3	7,6	8,2	8,5	8,1	7,4	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	13	13	14	13	13	14	14	13	12	11	12	11	13 km/h
en m/s	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	4 m/s
Vent dominant	E	SSE	SE	SSW	SSW	SSW	SE	SW	E	E	E	E	
Vent max horaire en m/s VV	17	23	13	12	13	12	14	13	12	12	14	13	
DD	NE	NNW	SE	SW	S	SE	SE	SW	SSE	SW	SSE	S	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>MAINIRANO : 18°03'S ; 14°02' E ; 33m</i>													
Température moyenne en ° C	27,3	27,5	27,4	26,9	24,9	23	22,7	23,5	24,8	26,2	27,1	27,5	
Durée d'insolation en heure et 1/10	250,1	235,8	267,4	294,2	310	292,5	300	311,1	309,5	327,2	315,8	268,4	
Vent max instantané en m/s VV	18	25	17	18	14	16	15	14	20	17	14	23	
DD	WNW	WNW	NW	S	SW	S	S	SSW	WNW	NW	WNW	N	
Température absolue Max	36,8	34,8	36,4	35,3	33,8	32	32,1	33,4	34,8	36,6	36,7	36,2	
Min	19,1	20,3	20,4	17	12,8	10,7	9,1	10,8	15	15,3	17,2	19,7	
Ecart moyen de température jour nuit	7,6	7,8	7,9	8,6	9	9,4	9,5	9,5	9,3	8,9	8,8	8,3	
Moyenne mensuelle et annuelle						W>							
Vitesse vent en km/h	12	11	11	11	12	12	12	13	14	14	14	12	12 km/h
en m/s	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	3	3 m/s
Vent dominant	ENE	E	E	E	E	E	E	E	ENE	NE	NE	W	
Vent max horaire en m/s VV	16	12	11	8	8	8	9	11	10	12	11	11	
DD	E	NNW	NW	S	SSW	S	S	SSW	WNW	NNW	NW	NW	
<i>MAHAJANGA : 15°40'S ; 46°21' E ; 18m</i>													
Température moyenne en ° C	27,3	27,4	27,7	27,9	26,5	25	24,7	25,2	26,2	27,3	27,9	27,6	
Durée d'insolation en heure et 1/10	189,6	177,7	227,3	283,1	312,7	294,5	302,9	313,2	317	335,7	292,3	223,7	
Vent max instantané en m/s VV	32	15	18	18	15	17	18	18	17	21	21	25	
DD	N	NNE	N	ENE	ESE	ESE	ESE	SE	SE	NE	NE	N	
Température absolue Max	37	35,9	35,4	36,3	35,1	33,9	34	35	35,9	36,3	39n1	36,7	
Min	17,6	20,3	20,2	17,7	15,1	13,4	14,3	14,6	14,5	17,4	17n1	19,8	
Ecart moyen de température jour nuit	7,2	7,2	7,9	9,9	10,4	11	11,5	12	11,7	10,4	8n5	7,5	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	14	13	12	12	12	13	14	15	16	16	16	13	14 km/h
en m/s	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4 m/s
Vent dominant	NW	NW	NW	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	NW	NW	
Vent max horaire en m/s VV	19	10	13	13	10	10	12	12	13	11	13	16	
DD	N	NW	N	NE	ESE	SE	SE	ESE	ESE	ESE	NE	N	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>MANANJARY : 21°12'S ; 48°22' E ; 6m</i>													
Température moyenne en ° C	26,2	26,1	25,6	24,4	22,4	20,7	20,1	20,2	21,1	22,6	24,1	25,4	
Durée d'insolation en heure et 1/10	243,1	222,9	199,5	207,1	201,9	190,4	180,1	194,5	224,4	244,8	214,1	205,4	
Vent max instantané en m/s VV	41	43	21	19	17	19	15	18	17	17	19	16	
DD	SW	W	S	SE	ESE	S	ESE	ENE	E	NE	SSE	NE	
Température absolue Max	34,8	36,6	35,1	33,6	31,8	29,7	28	30	30,8	30,6	32,3	32,2	
Min	17,8	18,7	15,8	16,9	11,1	7,9	10,8	11,1	10,2	12,7	14,6	18,1	
Ecart moyen de température jour nuit	7,5	7,6	7,1	7,5	8,2	8,4	8,4	8,6	8,8	8,4	7,8	7,5	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	12	11	12	10	10	9	10	12	13	15	14	12	12 km/h
en m/s	3	3	3	3	3	2	3	3	4	4	4	3	3 m/s
Vent dominant	ENE	E	E	E	E	E	E	E	ENE	NE	NE	ENE	
Vent max horaire en m/s VV	18	27	14	14	14	15	15	18	14	12	13	12	
DD													
<i>MOROMBE : 21°45'S ; 43°22' E ; 4m</i>													
Température moyenne en ° C	27,4	27,5	27,1	25,4	22,8	21,1	20,5	21,3	22,6	24,1	25,4	26,6	
Durée d'insolation en heure et 1/10	284,1	266,9	306,1	297,7	311,4	290,9	300,9	316,1	312	325,4	305,2	296,3	
Vent max instantané en m/s VV	35	18	19	16	17	18	27	24	22	25	20	62	
DD	NW	NNW	S	WSW	WSW	SSW	SW	SW	SW		SSW	NNE	
Température absolue Max	39,2	38,3	37,8	37	34,5	33,4	32,5	34,6	37,3	35,6	35,7	37,2	
Min	17	17,7	12,9	12,1	7,8	6,7	5,8	5,1	,74	9,2	12,8	12,2	
Ecart moyen de température jour nuit	9,4	9,6	10,5	11,7	13,2	13,7	14,1	13,8	12,9	11,6	10,6	9,8	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	16	14	15	15	15	14	15	17	17	18	17	15	16 km/h
en m/s	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	4	4 m/s
Vent dominant	NNW	NNW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	
Vent max horaire en m/s VV	24	22	26	13	1	23	24	15	15	18	17	17	
DD	NW	NNE	S	SSW	WSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SSW	SE	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>RANOHIRA : 22°33'S ; 45°24' E ; 824m</i>													
Température moyenne en ° C	24	24,1	23,2	22,1	19,6	17,4	17,3	18,5	20,6	22,9	23,9	23,9	
Durée d'insolation en heure et 1/10	232,8	229,8	242,6	249,9	275,5	260,1	265,3	277,6	291,2	298,9	253,9	226	
Vent max instantané en m/s VV	23	30	51	36	24	39	25	29	18	51	51	51	
DD	NW	E	E	E	ENE	E	E	E	E	S	NW	E	
Température absolue Max	34,5	34,3	34,4	33,6	31,9	28,6	30,6	32,1	35,2	36,4	39	35,8	
Min	15	14,1	9,5	5,9	6,1	1,6	1	3	5,4	4,8	9,7	10	
Ecart moyen de température jour nuit	10,9	10,4	11,5	13,4	14	14	14,3	15,2	16	16	14,1	11,8	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	12	11	11	9	9	10	10	11	11	12	12	11	11 km/h
en m/s	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	4	3	3 m/s
Vent dominant	NW	NW	ENE	ENE	NE	ENE	ENE	ENE	ENE	ENE	NE	NW	
Vent max horaire en m/s VV	11	13	13	15	13	16	16	18	12	17	21	16	
DD	NW	E	NNW	E	E	E	E	ENE	ENE	E	ENE	N	
<i>SAINTE MARIE : 17°05'S ; 49°49' E ; 3m</i>													
Température moyenne en ° C	26,7	26,6	26,2	25,3	24	22,6	21,8	21,9	22,4	23,6	25,1	26,1	
Durée d'insolation en heure et 1/10	236,8	221,7	198,9	191,9	191,6	164,9	168,3	194,4	224,2	251,3	242,9	230,9	
Vent max instantané en m/s VV	27	26	35	22	28	32	28	35	24	27	22	20	
DD	E	WSW	W	SE	SE	SSE	S	ESE	SSE	SSE	SSE	SSW	
Température absolue Max	35,1	34,3	34,8	32,1	30,4	29,1	29,4	27,2	28,5	30,5	33	33,4	
Min	20,6	19,9	18,9	19,6	17,4	14,3	15,9	16,3	16	16,9	18,6	18,6	
Ecart moyen de température jour nuit	5,5	5,2	5,1	4,8	4,7	4,7	4,7	4,7	5	5,2	5,5	5,5	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	11	11	14	13	14	15	16	16	13	11	11	10	13 km/h
en m/s	3	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4 m/s
Vent dominant	E	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	E	E	SE	
Vent max horaire en m/s VV	14	20	25	13	13	13	12	14	13	13	13	11	
DD	E	W	W	SW	SE	SSE	SE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSW	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>FORT -DAUPHIN : 25°02'S ; 46°57' E ; 9 m</i>													
Température moyenne en ° C	25,9	26	25,1	23,8	21,8	20,2	19,8	20,2	21,2	22,5	23,8	25,2	
Durée d'insolation en heure et 1/10	239,4	224,2	214	195,9	225,3	212,8	210,5	242,8	238,6	238,1	222,1	223	
Vent max instantané en m/s VV	25	24	56	21	19	23	22	22	24	26	24	22	
DD	NE	NNE			NNE			ENE					
Température absolue Max	34,2	35,4	34,5	32,5	31,3	29,4	28,8	28,8	30,8	32,2	33	34,7	
Min	18	18,2	15	13	11	9,4	9,2	8,8	9,9	13,1	14,8	16,3	
Ecart moyen de température jour nuit	9,2	9,2	8,8	9,6	9,9	9,9	9,6	10,6	11,7	12,3	11,6	10	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	8	8	8	6	5	6	7	8	8	9	8	7	7 km/h
en m/s	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2 m/s
Vent dominant	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	
Vent max horaire en m/s VV	13	13	13	11	11	13	13	13	13	16	18	15	
DD	NE	NE	NE	NE	NNE	ENE	NE	ENE	NE	ENE	ENE	ENE	
<i>IVATO : 18°48'S ; 47°29' E ; 1276m</i>													
Température moyenne en ° C	21,4	21,5	21	19,8	17,3	15,2	14,6	14,9	16,7	18,9	20,6	21,2	
Durée d'insolation en heure et 1/10	203,2	163	187,5	219,2	228,7	200,6	204,9	233,9	250,4	261,5	226,8	201	
Vent max instantané en m/s VV	29	32	21	21	15	17	20	21	21	22	35	34	
DD	E	W	S	E	SE	E	E	E	E	E	E	ENE	
Température absolue Max	31,5	31	30,1	29,8	28,5	27,7	25,8	28	29,7	31,8	32,3	30,4	
Min	11,8	11,9	11,3	8,8	2	1,7	1,3	1,1	3,2	4,9	6,7	11	
Ecart moyen de température jour nuit	9,6	9,8	9,4	10,4	11	11,2	11,1	11,9	13,1	14	12,3	10,4	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	11	10	10	9	9	9	10	10	12	11	10	9	10 km/h
en m/s	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2	3 m/s
Vent dominant	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
Vent max horaire en m/s VV	11	13	9	9	8	8	10	11	10	12	11	10	
DD	E	ENE	E	ENE	E	E	E	E	E	E	E	SW	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>DIEGO-SUAREZ : 12°21'S ; 49°18' E ; 105 m</i>													
Température moyenne en ° C	26,6	26,5	26,7	26,6	25,8	24,6	24	23,9	24,7	25,7	26,8	26,9	
Durée d'insolation en heure et 1/10	190,4	184,8	212,5	246,4	287,5	258,8	270,9	275,9	298,5	320	285,6	232,1	
Vent max instantané en m/s VV	39	34	20	23	35	37	35	35	46	33	24	24	
DD	W	W	W	ESE	SE	SE	SSE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	
Température absolue Max	34,4	33,2	32,7	32,3	32,4	30,9	31,1	31,5	32,1	33,9	34	34,6	
Min	19,4	20	20,7	18,8	16	15,8	14,9	14,6	16	17,5	17,4	20,1	
Ecart moyen de température jour nuit	7,3	7,4	7,5	7,9	8,7	8,8	8,9	9	9,3	9,2	8,8	8,2	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	14	12	14	19	21	23	26	27	29	29	23	17	21 km/h
en m/s	4	3	4	5	6	6	7	8	8	8	6	5	6 m/s
Vent dominant	W	W	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	E	E	
Vent max horaire en m/s VV	17	11	11	13	20	20	19	21	21	18	16	13	
DD	W	W	ESE	ESE	SE	SE	SE	SSE	SSE	ESE	SE	ESE	
<i>FARAFANGANA : 22°48'S ; 47°50' E ; 6m</i>													
Température moyenne en ° C	25,8	25,8	25,2	24	21,8	20,2	19,6	19,8	20,8	22,4	23,8	25	
Durée d'insolation en heure et 1/10	232,6	220,2	212,9	198,4	204,3	200,8	185,5	208,2	231,5	238,8	208,3	206,8	
Vent max instantané en m/s VV	29	24	38	40	24	22	24	24	19	20	39	23	
DD	SW	E	WNW	E	ESE	SE	ENE	ENE	ENE	E	SW		
Température absolue Max	36,9	36,3	34,8	31,9	31,5	30,2	28,3	29,8	29,5	29,7	31,4	34,8	
Min	18,2	18,2	15,3	13	10,9	6,2	7,9	8,8	8,4	10,7	13,3	17,4	
Ecart moyen de température jour nuit	6	6,4	6,1	6,7	7,6	8,2	7,8	7,6	7,4	6,5	5,9	6	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	16	15	15	13	11	11	12	14	18	20	18	16	15 km/h
en m/s	4	4	4	4	3	3	3	4	5	6	5	4	4 m/s
Vent dominant	NE	NE	E	E	SW	W	E	E	NE	NNE	NE	NE	
Vent max horaire en m/s VV	18	20	16	16	14	21	16	14	14	16	16	15	
DD	E	E	E	SE	ESE	SE	ENE	E	NE	E	ENE	E	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>FAUX-CAP : 25°33'S ; 45°32' E ; 22 m</i>													
Température moyenne en ° C	26,4	26,6	25,8	24,3	22,4	20,7	20,6	20,6	21,5	22,8	24,2	25,8	
Durée d'insolation en heure et 1/10	278,7	257,8	260,5	241,4	253,5	234	249,7	276	268,9	276,5	270,2	268,4	
Vent max instantané en m/s VV	29	25	22	21	26	31	22	24	21	25	26	21	
DD	E	ENE	ESE	ESE	SSE	NNW	E	E	E	E	SE	NE	
Température absolue Max	35,5	37,3	34,9	35,1	36,4	33	31,6	31,6	33,7	34,1	36	37,8	
Min	16,1	17,2	16	3,2	12,3	10,3	9,1	10,5	10	11,9	13,7	16,9	
Ecart moyen de température jour nuit	6,3	6,2	5,4	62	6,2	6,8	6,7	6,9	6,9	7	6,6	6,5	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	25	25	28	25	24	24	24	26	26	26	26	25	21km/h
en m/s	7	7	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7 m/s
Vent dominant	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
Vent max horaire en m/s VV	16	17	26	16	19	20	21	18	18	18	20	18	
DD	SE	E	ESE	ENE	SSE	ESE	ENE	E	ENE	E	E	SSE	
<i>FIANARANTSOA : 21°27'S ; 47°06' E ; 1109m</i>													
Température moyenne en ° C	21,4	21,3	20,6	19,6	17,2	15,2	14,5	15,1	16,8	19,1	20,6	21,2	
Durée d'insolation en heure et 1/10	194,3	183	171	185,4	188,6	171,2	160	184,1	226,1	242,1	200,5	176,1	
Vent max instantané en m/s VV	21	36	22	19	21	17	15	16	19	32	32	27	
DD	NW	S	W	E	W	NW	SE	ESE	ESE	E	W	ESE	
Température absolue Max	30,7	31,1	30,7	30,3	28,8	28,8	25,2	29,3	30,2	32,3	33,5	31,6	
Min	16,1	17,2	16	3,2	12,3	10,3	9,1	10,5	10	11,9	13,7	16,9	
Ecart moyen de température jour nuit	9,2	9,2	8,8	9,6	9,9	9,9	9,6	10,6	11,7	12,3	11,6	10	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	8	8	8	6	5	6	7	8	8	9	8	7	7 km/h
en m/s	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2 m/s
Vent dominant	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
Vent max horaire en m/s VV	12	16	15	8	8	11	10	10	13	13	13	10	
DD	W	ESE ²	W	SSE	W	W	SE	ESE	ESE	NW	ESE	NW	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>ARIVONIMAMO : 19°02'S ; 47°10' E ; 1450 m</i>													
Température moyenne en ° C	20,2	20,2	19,8	18,7	16,3	14,5	14	14,5	16,3	18,4	19,6	20	
Durée d'insolation en heure et 1/10													
Vent max instantané en m/s VV	34	37	28	41	16,3	30	36	31	28	29	40	23	
DD	SW	SE	SSE	ESE	ESE	ESE	SE	ENE	ESE	ESE	NW	E	
Température absolue Max	31,9	29	28,3	28	28,3	24,9	24,6	21,8	29,7	32,4	2,3	30,1	
Min	9,6	10,6	9,6	5,4	1	1,4	0,2	2	1,7	4	8,5	9,7	
Ecart moyen de température jour nuit	9,7	9,9	7,9	11	11,4	11,5	11,5	12,1	13,3	13,7	12,2	10,4	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	12	12	13	13	14	15	16	18	16	14	12	11	14km/h
en m/s	3	3	4	4	4	4	4	5	4	4	3	3	4 m/s
Vent dominant	ESE	ESE	E	E	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	E	E	
Vent max horaire en m/s VV	15	25	18	18	14	16	21	21	19	18	12	15	
DD	SE	SE	SE	SE	E	ESE	SE	ESE	ESE	S	ESE	E	
<i>BESALAMPY : 16°45'S ; 44°29' E ; 36m</i>													
Température moyenne en ° C	27,3	27,4	27,5	27,6	25,8	24,2	24	24,7	25,9	27,2	27,9	27,8	
Durée d'insolation en heure et 1/10	221,5	201,5	243,2	273,1	302,4	297,8	302,2	305,9	305,9	315,9	303	201,8	
Vent max instantané en m/s VV	23	15	15	14	11	12	14	12	14	13	13	15	
DD	N	WNW	ESE	E	SSE	SSE	SSE	SSE	WSW	SW	SW	E	
Température absolue Max	36,8	35,3	35,8	36,2	35,2	35	34,7	34,8	37,3	37,7	38,8	37,7	
Min	18,6	19,4	16,7	17,2	13,3	11	11,2	11,9	14	15	16,1	19,5	
Ecart moyen de température jour nuit	21,3	11,3	12,2	13,3	14,4	14,6	15	15,4	14,8	13,3	11,5	11,3	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	9	8	7	7	8	9	9	10	11	11	11	9	9 km/h
en m/s	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2 m/s
Vent dominant	W	W	W	SSW	SSW	SSW	SSW	W	W	W	W	W	
Vent max horaire en m/s VV	17	9	7	6	9	8	9	10	10	10	9	10	
DD	NNW	WNW	WSW	SW	SW	S	WNW	SSW	SW	NW	WNW	NW	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>ANTALAHA : 14°53'S ; 50°15' E ; 88 m</i>													
Température moyenne en ° C	26,2	26,3	26,1	25,4	24,1	22,6	21,9	21,8	22,2	23,2	24,6	25,6	
Durée d'insolation en heure et 1/10	216,6	219	219,4	213,4	214,7	191,7	190,1	196	240,6	240,6	229,1	235,7	
Vent max instantané en m/s VV	29	17	18	18	20	21	24	19	18	18	18	22	
DD	ENE	E	SSE	SSE	S	ESE	ESE	SSE	E	SE	E	ESE	
Température absolue Max	34,4	34,5	33,2	33,2	31,7	30	28,5	29,3	29,3	30,8	31	34,3	
Min	19,4	19,5	16,8	16,8	14,9	12,4	13,6	13,9	14,4	15	16,7	17,8	
Ecart moyen de température jour nuit	73	76	74	74	74	74	73	73	78	79	76	76	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	9	9	10	10	10	10	11	12	12	11	9	9	10 km/h
en m/s	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3 m/s
Vent dominant	E	E	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	SSE	E	E	
Vent max horaire en m/s VV	16	9	10	13	8	8	9	9	11	10	11	12	
DD	SSE	E	E	S	SSE	SSE	SSE	SSE	SE	SE	NNE	ESE	
<i>ANTSIRABE : 19°49'S ; 47°04' E ; 1532m</i>													
Température moyenne en ° C	19,4	19,6	18,8	17,4	14,7	12,6	12,5	13,2	14,9	17,2	18,5	19,2	
Durée d'insolation en heure et 1/10	185,1	191,9	179,8	232,4	247,9	228	200,7	244,8	241,9	219,4	230,4	164,6	
Vent max instantané en m/s VV	23	15	19	13	16	11	16	14	17	13	13	14	
DD	NE	W	E	E	ENE	E	E	WNW	E	W	E	E	
Température absolue Max	29,6	28,9	28,1	28,3	26,4	25,2	25,4	27,6	29,2	30,6	31,7	30,4	
Min	6,4	8,3	5,3	3,5	-1,3	-5,3	-2,7	-4,6	-3,4	1	4,6	8,4	
Ecart moyen de température jour nuit	11,6	12	11,4	13,6	14,9	15,9	15,2	16,3	18,2	17,6	14,8	12,2	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	9	8	8	7	8	8	9	11	11	11	10	9	9 km/h
en m/s	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2 m/s
Vent dominant	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	
Vent max horaire en m/s VV	9	10	13	8	8	8	8	8	12	10	8	10	
DD	NNW	W	E	ENE	E	W	E	E	E	W	W	E	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>ANALALAVA : 14°38'S ; 47°46' E ; 57 m</i>													
Température moyenne en ° C	26,8	26,8	27,3	26,7	26,8	25,5	25,1	25,4	26,1	26	27,1	27	
Durée d'insolation en heure et 1/10	215,7	205,5	257,4	273	306,1	296	307,8	314,6	315,4	9	290,5	229,6	
Vent max instantané en m/s VV	24	29	23	21	20	19	21	20	19	331,4	27	21	
DD	ESE	NW	NE	ESE	ENE	ESE	ESE	ESE	NW	20	SE	NW	
Température absolue Max	36	35,7	36	35,5	35,7	34,1	34,4	34,8	36,1	37	37	36,1	
Min	19,7	20,1	20	19,2	16,3	14,8	14,4	16,3	16,4	18,7	17,6	19,6	
Ecart moyen de température jour nuit	7,5	7,5	8,1	9,4	10,4	10,7	11,2	10,8	11,8	10,6	8,7	7,9	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	10	10	10	10	13	15	18	19	15	13	11	9	13 km/h
en m/s	3	3	3	3	4	4	5	5	4	4	3	3	4 m/s
Vent dominant	W	W	W	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	W	W	W	
Vent max horaire en m/s VV	19	16	11	11	13	16	16	16	17	15	10	14	
DD	ESE	E	ESE	E	SE	SSE	ESE	SE	SE	SE	SE	NE	
<i>ANDAPA : 14°39'S ; 49°37' E ; 474m</i>													
Température moyenne en ° C	24,8	25	24,8	23,7	21,7	20	19	19	19,7	21,2	32,2	24,5	
Durée d'insolation en heure et 1/10	156,2	168	164,1	151,4	136,6	119,4	109	107,6	142	184,4	166,9	174,8	
Vent max instantané en m/s VV	52	25	25	12	12	11	12	15	13	15	12	27	
DD	ESE	E	E	E	SE	S	SE	SSE	SSW	E	NW	E	
Température absolue Max	35,7	34,5	34,5	33,6	32,2	30,2	29,2	29,4	30,4	32,9	35,3	34,6	
Min	14,8	13,9	13,9	12,9	7	4,6	5,9	7,5	5,8	5	9	10,6	
Ecart moyen de température jour nuit	10,9	10,9	10,5	10,1	10,6	10,3	10	10,1	11,5	12,2	11,7	11,5	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	3	3	3	3	2	2	3	3	4	4	4	4	3 km/h
en m/s	1	1	1	1	1	1	14	1	1	1	1	1	1 m/s
Vent dominant	E	E	E	E	SE	SE	SE	SE	E	ESE	E	E	
Vent max horaire en m/s VV	19	10	6	6	6	5	6	6	7	7	6	11	
DD	ENE	SSW	E	E	SSE	S	SE	S	SE	SE	E	E	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>MORONDAVA : 20°17'S ; 44°19' E ; 8 m</i>													
Température moyenne en ° C	27,6	27,6	27,3	26	25,3	21,5	21,1	22	23,6	25,3	26,6	27,4	
Durée d'insolation en heure et 1/10	267,3	258,4	288,7	286,9	303,9	286,9	295,2	307,3	301,6	325	313,7	273,3	
Vent max instantané en m/s VV	28	37	20	19	16	13	12	62	24	18	17	39	
DD	NNW	NW	NNW	NE	N	ESE	SW	SSW	WNW	WNW	SSW	N	
Température absolue Max	38,9	38	37,9	36,4	34,7	33,4	33,2	34	37,7	35,2	37,2	38,2	
Min	17,3	19,3	15,2	11,8	10,7	7	6,5	9,2	10,1	10,5	16	15,7	
Ecart moyen de température jour nuit	8,3	8,6	9,4	11,2	12,9	13,8	14,1	13,1	11,7	10	9,4	8,7	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	10	9	8	8	7	7	8	9	11	11	11	11	9 km/h
en m/s	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2 m/s
Vent dominant	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W	
Vent max horaire en m/s VV	14	18	12	11	8	10	10	18	11	11	11	22	
DD	NNW	NW	NNW	NE	SSW	SW	WSW	SSW	W	WNW	NNW	N	
<i>NOSY-BE : 13°19'S ; 48°19' E ; 9m</i>													
Température moyenne en ° C	26,9	26,9	27,2	27,1	26	24,5	23,7	23,9	25	26,2	27	27	
Durée d'insolation en heure et 1/10	200,6	189,2	232,5	248,8	276,5	249	274,9	293,1	287,3	301	257	218,1	
Vent max instantané en m/s VV	53	17	21	19	14	11	11	15	17	17	17	27	
DD	NE	NNE	NE	ENE	ENE	WSW	ENE	NE	ENE	ENE	ENE	WSW	
Température absolue Max	33,8	34,2	34,7	34,5	34	32,5	32,2	32,9	33,9	35,1	35,4	34,4	
Min	19,8	19,8	20,6	19,1	15,1	13,6	13,2	13,8	14,3	15,2	18,3	20,2	
Ecart moyen de température jour nuit	7,8	7,7	8	8,5	9,1	9,7	10,4	10,4	10,5	10,3	9,3	8,3	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	6	6	6	5	5	5	6	6	7	8	7	6	6 km/h
en m/s	2	2	2	2	2	2	2	2	258	2	2	2	2 m/s
Vent dominant	WSW	W	W	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	WSW	NE	W	W	
Vent max horaire en m/s VV	13	9	11	8	7	6	7	9	9	9	8	11	
DD	E	WSW	NE	ENE	NE	WSW	NE	ENE	ENE	ENE	ENE	WSW	

STATIONS	JANV	FEVR	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	ANNEE
<i>VOHEMAR : 13°22'S ; 50°00' E ; 5m</i>													
Température moyenne en ° C	27	27	27	26,2	25,2	23,9	23,1	22,9	23,4	24,5	25,9	26,6	
Durée d'insolation en heure et 1/10	222,9	222,3	236,1	242,9	238	245,7	238,1	233,5	247,1	274,7	266,2	255,6	
Vent max instantané en m/s VV	18	19	16	18	22	28	28	28	25	24	18	31	
DD	SSW	NE	SSE	SSE	SSW	S	S	S	SSW	SSE	SSE	SSE	
Température absolue Max	35,1	35,5	35	33,3	32,6	32	29,5	29,9	293,8	31,8	32,4	34,8	
Min	20,3	20,8	20	19,2	16	15,3	14,6	15,1	16,4	17,3	18	19	
Ecart moyen de température jour nuit	7,2	7,4	7,1	7	7,2	7,2	7,1	7,1	7,4	7,6	7,5	7,5	
Moyenne mensuelle et annuelle													
Vitesse vent en km/h	15	13	15	21	25	26	30	30	29	26	21	16	22 km/h
en m/s	3	2	3	3	3	4	4	4	4	4	3	2	6 m/s
Vent dominant	SSE	SSE	SSE	SSE	S	S	S	S	SSE	SSE	SSE	SE	
Vent max horaire en m/s VV	13	12	12	13	14	18	18	16	16	16	13	14	
DD	SSE	SSE	SSE	SSE	S	SSE	SSE	SSE	S	SSE	SSE	SSE	

ANNEXE II : LES COEFFICIENTS DU PROFIL

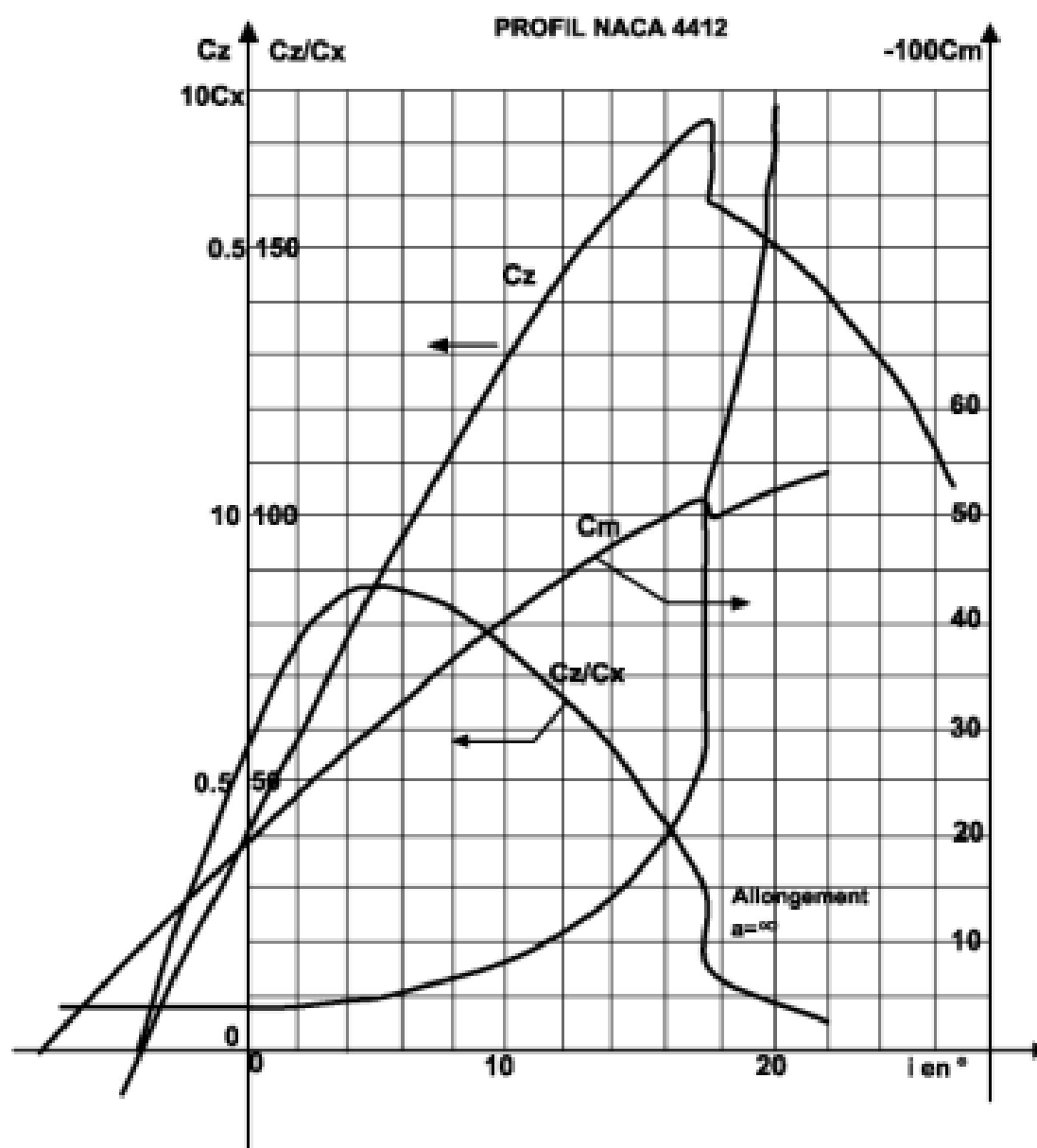
ANNEXE II-1- Caractéristiques aérodynamiques du profil NACA 4412 :

incidence (en °)	Cz	Cx	Cm (c/4)	Cm/Cz (en %)
-16	-0.55		+0.01	-2
-14	-0.75		-0.025	+3.3
-12	-0.8		-0.045	+5.6
-10	-0.7	0.010	-0.075	+10.7
-8	-0.45	0.008	-0.1	+22.2
-6	-0.25	0.007	-0.1	+40
-4	-0.05	0.0065	-0.1	+200
-2	+0.2	0.006	-0.1	-50
0	+0.4	0.006	-0.1	-25
2	+0.6	0.006	-0.1	-16.7
4	+0.8	0.0065	-0.1	-12.5
5	+0.9	0.007	-0.1	-11.1
6	+1.0	0.008	-0.1	-10
7	+1.1	0.009	-0.09	-8.2
8	+1.2	0.0105	-0.08	-6.7
10	+1.3	0.012	-0.075	-5.8
12	+1.45	0.014	-0.07	-4.8
14	+1.5	0.016	-0.065	-4.3
16	+1.4		-0.065	-4.6

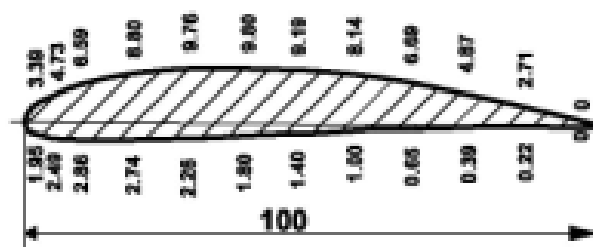
X (%)	Y (%)
1,25	2,44
2,5	3,39
5	4,73
7,5	5,76
10	6,59
15	7,89
20	8,8
25	9,41
30	9,76
40	9,8
50	9,19
60	8,14
70	6,69
80	4,89
90	2,71
95	1,47
0	0
100	0,13
1,25	-1,43
2,5	-1,95
5	-2,49
7,5	-2,7
10	-2,8
15	-2,88
20	-2,74
25	-2,5
30	-2,26
40	-1,8
50	-1,4
60	-1
70	-0,65
80	-0,39
90	-0,22
95	-0,16
100	0,13

ANNEXE II-2- Valeurs optimales des paramètres de fonctionnement en fonction de λ :

λ	λ_e	k	h	Cp	Czpl/r	I	λ	λ_e	k	h	Cp	Czpl/r	I
0.100	0.670	0.473	8.866	0.116	11.149	56.193	5.100	7.704	0.335	1.017	0.588	0.209	7.387
0.200	0.768	0.451	4.574	0.207	9.819	52.460	5.200	7.853	0.335	1.016	0.588	0.201	7.257
0.300	0.873	0.432	3.168	0.279	8.600	48.867	5.300	8.002	0.335	1.016	0.588	0.194	7.123
0.400	0.984	0.416	2.483	0.336	7.506	45.466	5.400	8.151	0.335	1.015	0.588	0.187	6.994
0.500	1.099	0.403	2.086	0.381	6.541	42.290	5.500	8.300	0.335	1.015	0.588	0.180	6.870
0.600	1.219	0.393	1.830	0.416	5.700	39.358	5.600	8.449	0.335	1.014	0.588	0.174	6.750
0.700	1.343	0.384	1.655	0.444	4.975	36.672	5.700	8.598	0.335	1.014	0.589	0.168	6.634
0.800	1.470	0.377	1.530	0.467	4.353	34.227	5.800	8.747	0.335	1.013	0.589	0.163	6.522
0.900	1.600	0.371	1.437	0.485	3.821	32.009	5.900	8.897	0.335	1.013	0.589	0.157	6.413
1.00	1.732	0.366	1.366	0.500	3.367	30.000	6.000	9.046	0.335	1.012	0.589	0.152	6.308
1.100	1.866	0.362	1.311	0.512	2.980	28.183	6.100	9.195	0.335	1.012	0.589	0.147	6.207
1.200	2.002	0.359	1.267	0.522	2.648	26.537	6.200	9.344	0.335	1.011	0.589	0.143	6.108
1.300	2.140	0.356	1.232	0.531	2.363	25.046	6.300	9.494	0.335	1.011	0.589	0.138	6.013
1.400	2.279	0.353	1.203	0.538	2.118	23.692	6.400	9.643	0.335	1.011	0.589	0.134	5.920
1.500	2.419	0.351	1.179	0.544	1.906	22.460	6.500	9.792	0.334	1.010	0.589	0.130	5.831
1.600	2.560	0.349	1.159	0.549	1.723	21.337	6.600	9.942	0.334	1.010	0.590	0.126	5.744
1.700	2.702	0.348	1.142	0.553	1.563	20.310	6.700	10.091	0.334	1.010	0.590	0.122	5.659
1.800	2.844	0.346	1.128	0.557	1.423	19.370	6.800	10.241	0.334	1.010	0.590	0.119	5.577
1.900	2.988	0.345	1.115	0.560	1.300	18.506	6.900	10.390	0.334	1.009	0.590	0.116	5.498
2.000	3.132	0.344	1.105	0.563	1.191	17.710	7.000	10.539	0.334	1.009	0.590	0.112	5.420
2.100	3.276	0.343	1.095	0.565	1.095	16.976	7.100	10.689	0.334	1.009	0.590	0.109	5.345
2.200	3.421	0.343	1.087	0.568	1.010	16.296	7.200	10.833	0.334	1.009	0.590	0.106	5.271
2.300	3.566	0.342	1.080	0.570	0.934	15.666	7.300	10.988	0.334	1.008	0.590	0.103	5.200
2.400	3.711	0.341	1.074	0.571	0.865	15.080	7.400	11.137	0.334	1.008	0.590	0.101	5.131
2.500	3.857	0.341	1.068	0.573	0.804	14.534	7.500	11.287	0.334	1.008	0.590	0.098	5.063
2.600	4.003	0.340	1.063	0.574	0.749	14.025	7.600	11.436	0.334	1.008	0.590	0.096	4.997
2.700	4.150	0.340	1.059	0.576	0.699	13.549	7.700	11.586	0.334	1.007	0.590	0.093	4.933
2.800	4.296	0.339	1.055	0.577	0.604	13.103	7.800	11.735	0.334	1.007	0.590	0.091	4.871
2.900	4.443	0.339	1.051	0.578	0.613	12.684	7.900	11.885	0.334	1.007	0.590	0.088	4.810
3.000	4.590	0.339	1.048	0.579	0.586	12.290	8.000	12.034	0.334	1.007	0.591	0.086	4.750
3.100	4.737	0.338	1.045	0.580	0.542	11.919	8.100	12.184	0.334	1.007	0.591	0.084	4.692
3.200	4.884	0.338	1.042	0.580	0.511	11.569	8.200	12.334	0.334	1.007	0.591	0.082	4.635
3.300	5.032	0.338	1.040	0.581	0.482	11.239	8.300	12.483	0.334	1.006	0.591	0.080	4.580
3.400	5.180	0.337	1.038	0.582	0.456	10.926	8.400	12.633	0.334	1.006	0.591	0.078	4.526
3.500	5.328	0.337	1.036	0.582	0.431	10.630	8.500	12.782	0.334	1.006	0.591	0.077	4.473
3.600	5.476	0.337	1.034	0.583	0.409	10.349	8.600	12.932	0.334	1.006	0.591	0.075	4.422
3.700	5.624	0.337	1.032	0.583	0.388	10.083	8.700	13.082	0.334	1.006	0.591	0.073	4.371
3.800	5.772	0.337	1.030	0.584	0.369	9.829	8.800	13.231	0.334	1.006	0.591	0.071	4.322
3.900	5.920	0.336	1.029	0.584	0.351	9.588	8.900	13.381	0.334	1.006	0.591	0.070	4.274
4.000	6.068	0.336	1.027	0.585	0.334	9.358	9.000	13.531	0.334	1.005	0.591	0.068	4.227
4.100	6.217	0.336	1.026	0.585	0.319	9.138	9.100	13.680	0.334	1.005	0.591	0.067	4.181
4.200	6.365	0.336	1.025	0.585	0.305	8.928	9.200	13.830	0.334	1.005	0.591	0.065	4.136
4.300	6.514	0.336	1.024	0.586	0.291	8.728	9.300	13.980	0.334	1.005	0.591	0.064	4.092
4.400	6.662	0.336	1.023	0.586	0.278	8.536	9.400	14.129	0.334	1.005	0.591	0.063	4.048
4.500	6.811	0.336	1.022	0.586	0.267	8.353	9.500	14.279	0.334	1.005	0.591	0.061	4.006
4.600	6.960	0.336	1.021	0.586	0.255	8.177	9.600	14.429	0.334	1.005	0.591	0.060	3.965
4.700	7.108	0.336	1.020	0.587	0.245	8.008	9.700	14.578	0.334	1.005	0.591	0.059	3.924
4.800	7.257	0.335	1.019	0.587	0.235	7.846	9.800	14.728	0.334	1.005	0.591	0.058	3.884
4.900	7.406	0.335	1.018	0.587	0.226	7.690	9.900	14.878	0.334	1.005	0.591	0.057	3.845
5.000	7.555	0.335	1.018	0.587	0.217	7.540	10.00	15.028	0.334	1.004	0.591	0.055	3.807



GEOMETRIE DU PROFIL



ANNEXE III :
EVALUATION DES EFFORTS AXIAUX ET
TANGENTIELS – CALCUL DU COUPLE
MOTEUR

ANNEXE III-1 La vitesse relative au démarrage :

i [°]	I [°]	I[rad]	r[m]	λ	h	cos I	w [rad]	W
11,22	34,227	0,59737384	0,1	0,8	1,53	0,82681561	24	3,67191908
9,66	21,337	0,3724009	0,2	1,6	1,159	0,93145646	24	5,56290095
8,1	15,08	0,26319565	0,3	2,4	1,074	0,96556351	24	7,73268662
6,54	11,569	0,20191714	0,4	3,2	1,042	0,9796839	24	10,0048597
4,98	9,357	0,16331046	0,5	4	1,027	0,98669446	24	12,3260042

ANNEXE III-2 La vitesse relative en régime nominal :

i[°]	I[°]	I[rad]	r[m]	λ	h	cos I	w[rad]	W
11,22	34,227	0,59737384	0,1	0,8	1,53	0,82681561	48	7,34383813
9,66	21,337	0,3724009	0,2	1,6	1,159	0,93145646	48	11,1258018
8,1	15,08	0,26319565	0,3	2,4	1,074	0,96556351	48	15,4653732
6,54	11,569	0,20191714	0,4	3,2	1,042	0,9796839	48	20,0097195
4,98	9,357	0,16331046	0,5	4	1,027	0,98669446	48	24,6520083

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r(1+k)}{2 \cos I}$$

Avec :

- I : l'angle que fait W avec le plan de rotation de l'hélice [°]
h : coefficient sans dimension
 ω : la vitesse angulaire de l'hélice [rad/s]
r : la distance par rapport à l'axe de rotation [m]

ANNEXE III-3 La poussée axiale et le couple moteur au démarrage :

r	r[kg/m3]	p	l[m]	W	Cz	Cx	I [°]	e [°]	I-e [°]	cos (I-e)	cos(e)	Intégr(dr)	Fi[N]
0,1	1,225	3	0,0945912	3,67191908	1,5339698	0,00209322	34,227	0,07818457	34,1488154	0,82758238	0,99999907	0,1	0,29750385
0,2	1,225	3	0,0784018	5,56290095	1,4651025	0,00194643	21,337	0,07611914	21,2608809	0,93193902	0,99999912	0,1	0,60871209
0,3	1,225	3	0,0639304	7,73268662	1,3530339	0,00172375	15,08	0,07299408	15,0070059	0,96589417	0,99999919	0,1	0,917982
0,4	1,225	3	0,0568838	10,0048597	1,1977641	0,00144836	11,569	0,06928316	11,4997168	0,97992569	0,99999927	0,1	1,22801162
0,5	1,225	3	0,0557061	12,3260042	0,999293	0,0011524	9,357	0,06607426	9,29092574	0,9868813	0,99999934	0,1	1,53367164
												F[N]	4,58588121

r	r[kg/m3]	p	l[m]	W	Cz	Cx	I[°]	e[°]	I-e[°]	sin(I-e)	cos(e)	Intégr(rdr)	Mi[Nm]
0,1	1,225	3	0,0945912	3,67191908	1,5339698	0,00209322	34,227	0,07818457	34,1488154	0,67181823	0,99999907	0,005	0,00253653
0,2	1,225	3	0,0784018	5,56290095	1,4651025	0,00194643	21,337	0,07611914	21,2608809	0,49883617	0,99999912	0,015	0,01382625
0,3	1,225	3	0,0639304	7,73268662	1,3530339	0,00172375	15,08	0,07299408	15,0070059	0,38083368	0,99999919	0,025	0,03352997
0,4	1,225	3	0,0568838	10,0048597	1,1977641	0,00144836	11,569	0,06928316	11,4997168	0,30300358	0,99999927	0,035	0,06189652
0,5	1,225	3	0,0557061	12,3260042	0,999293	0,0011524	9,357	0,06607426	9,29092574	0,24979336	0,99999934	0,045	0,09868905
												C[Nm]	0,21047832

ANNEXE III-4 La poussée axiale et le couple en régime nominal :

R	r[kg/m3]	p	l[m]	W	Cz	Cx	I[°]	ε[°]	I- ε [°]	cos(I- ε)	cos(ε)	Intégr(dr)	Fi[N]
0,1	1,225	3	0,0945912	7,34383813	1,5339698	0,00209322	34,227	0,07818457	34,1488154	0,82758238	0,99999907	0,1	1,190015788
0,2	1,225	3	0,0784018	11,1258018	1,4651025	0,00194643	21,337	0,07611914	21,2608809	0,93193902	0,99999912	0,1	2,434848292
0,3	1,225	3	0,0639304	15,4653732	1,3530339	0,00172375	15,08	0,07299408	15,0070059	0,96589417	0,99999919	0,1	3,671927968
0,4	1,225	3	0,0568838	20,0097195	1,1977641	0,00144836	11,569	0,06928316	11,4997168	0,97992569	0,99999927	0,1	4,912049135
0,5	1,225	3	0,0557061	24,6520083	0,999293	0,0011524	9,357	0,06607426	9,29092574	0,9868813	0,99999934	0,1	6,134692015
												FN]	18,3435332
r	r[kg/m3]	p	l[m]	W	Cz	Cx	I[°]	ε[°]	I- ε[°]	sin(I- ε)	cos(ε)	Intégr(rdr)	Mi[Nm]
0,1	1,225	3	0,0945912	7,34383813	1,5339698	0,00209322	34,227	0,07818457	34,1488154	0,67181823	0,99999907	0,005	0,048301796
0,2	1,225	3	0,0784018	11,1258018	1,4651025	0,00194643	21,337	0,07611914	21,2608809	0,49883617	0,99999912	0,015	0,195494078
0,3	1,225	3	0,0639304	15,4653732	1,3530339	0,00172375	15,08	0,07299408	15,0070059	0,38083368	0,99999919	0,025	0,36194282
0,4	1,225	3	0,0568838	20,0097195	1,1977641	0,00144836	11,569	0,06928316	11,4997168	0,30300358	0,99999927	0,035	0,531600478
0,5	1,225	3	0,0557061	24,6520083	0,999293	0,0011524	9,357	0,06607426	9,29092574	0,24979336	0,99999934	0,045	0,698749079
												C[Nm]	1,836088251

ANNEXE III-5 La poussée sur une pale pour V = 40 [m/s]:

r	r[kg/m3]	p	l[m]	W	Cz	Cx	I[°]	ε[°]	I- ε [°]	cos(I- ε)	cos(ε)	Intégr (dr)	Fi[N]
0,1	1,225	1	0,070674	48,9589208	1,5339698	0,00209322	34,227	0,07818457	34,1488154	0,82758238	0,99999907	0,1	13,172187
0,2	1,225	1	0,075131	74,1720123	1,4651025	0,00194643	21,337	0,07611914	21,2608809	0,93193902	0,99999912	0,1	34,5669669
0,3	1,225	1	0,067375	103,102488	1,3530339	0,00172375	15,08	0,07299408	15,0070059	0,96589417	0,99999919	0,1	57,3299729
0,4	1,225	1	0,060573	133,39813	1,1977641	0,00144836	11,569	0,06928316	11,4997168	0,97992569	0,99999927	0,1	77,4906693
0,5	1,225	1	0,057262	164,346722	0,999293	0,0011524	9,357	0,06607426	9,29092574	0,9868813	0,99999934	0,1	93,4227721
												F[N]	275,98257

ANNEXE III-6 La poussée axiale et le couple pour V = 40[m/s] :

r	r[kg/m3]	p	l[m]	W	Cz	Cx	I[°]	e[°]	I-e[°]	cos(I-e)	cos(e)	Intégr(dr)		Fi[N]
0,1	1,225	3	0,070674	48,9589208	1,5339698	0,00209322	34,227	0,07818457	34,1488154	0,82758238	0,99999907	0,1		39,5165609
0,2	1,225	3	0,075131	74,1720123	1,4651025	0,00194643	21,337	0,07611914	21,2608809	0,93193902	0,99999912	0,1		103,700901
0,3	1,225	3	0,067375	103,102488	1,3530339	0,00172375	15,08	0,07299408	15,0070059	0,96589417	0,99999919	0,1		171,989919
0,4	1,225	3	0,060573	133,39813	1,1977641	0,00144836	11,569	0,06928316	11,4997168	0,97992569	0,99999927	0,1		232,472008
0,5	1,225	3	0,057262	164,346722	0,999293	0,0011524	9,357	0,06607426	9,29092574	0,9868813	0,99999934	0,1		280,268316
												F[N]		827,9477

r	r[kg/m3]	p	l[m]	W	Cz	Cx	I[°]	e[°]	I-e[°]	sin(I-e)	cos(e)	Y	Intégr(rdr)	Mi[Nm]
0,1	1,225	6	0,070674	48,9589208	1,5339698	0,00209322	34,227	0,07818457	34,1488154	0,67181823	0,99999907	-	0,005	1,60394582
0,2	1,225	6	0,075131	74,1720123	1,4651025	0,00194643	21,337	0,07611914	21,2608809	0,49883617	0,99999912	-	0,015	8,32614993
0,3	1,225	6	0,067375	103,102488	1,3530339	0,00172375	15,08	0,07299408	15,0070059	0,38083368	0,99999919	-	0,025	16,9530875
0,4	1,225	6	0,060573	133,39813	1,1977641	0,00144836	11,569	0,06928316	11,4997168	0,30300358	0,99999927	-	0,035	25,1589972
0,5	1,225	6	0,057262	164,346722	0,999293	0,0011524	9,357	0,06607426	9,29092574	0,24979336	0,99999934	-	0,045	31,9229111
													C[Nm]	83,9650916

$$dF = p dF_v = \frac{1}{2} \rho p l W^2 C_z \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr$$

$$dM = r p dF_u = \frac{1}{2} \rho p l r W^2 C_z \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr$$

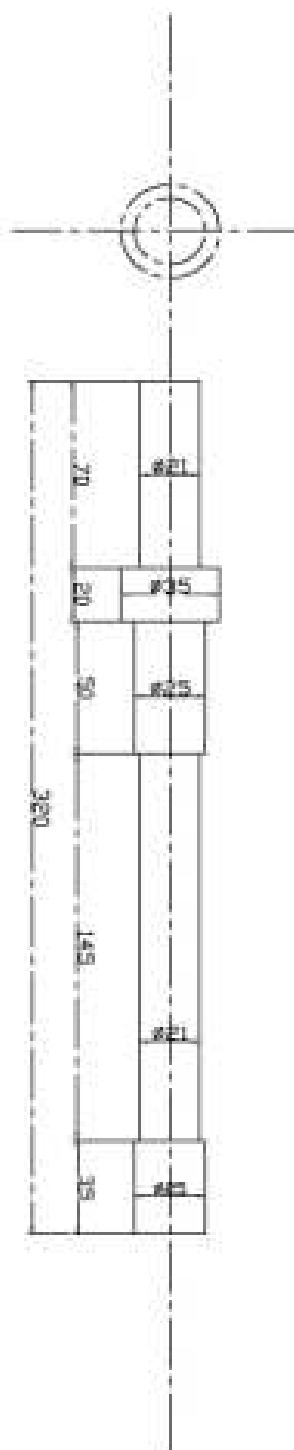
ε :	l'angle que fait la résultante dR avec dRz	[°]	avec $\text{tg}\varepsilon = C_x / C_z$
p :	le nombre de pales		
W :	la vitesse relative du vent	[m/s]	
ρ :	la masse volumique de l'air	[kg/m ³]	
l :	la largeur de la pale	[m]	

Ce calcul utilise une approximation sur la détermination d'un calcul de centre de gravité des rectangles dont les surfaces sont différentes alignées sur une côtés.

Le centre de poussée est déterminé par la relation suivante : $rp = \frac{\sum S_i . x_i}{\sum S_i}$

Avec , S_i : la surface de chaque tronçon $r = 0,1[m]$
 x_i : le centre de gravité de chaque surface

ANNEXE III :
DESSINS TECHNIQUES



Echelle : 1:2

AXE DU PIVOT

Dessiné par :
-ZAAR
-DAMI



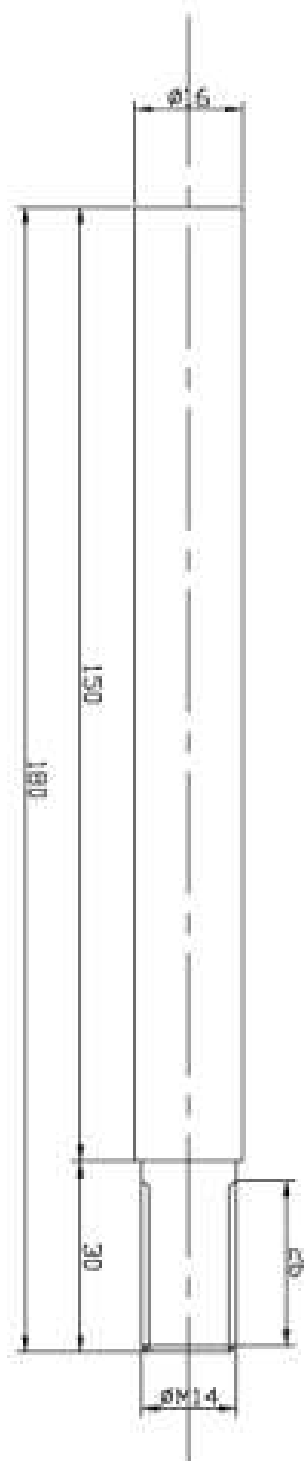
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

A 4-H

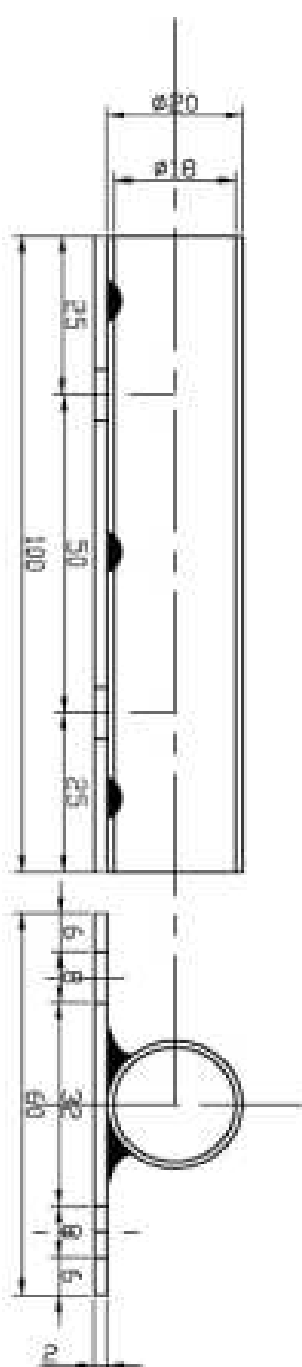
Desssin N°

0 0

AXE



FIXATION DE LA PALE



Echelle : 1:2



AXE ET FIXATION DE LA PALE

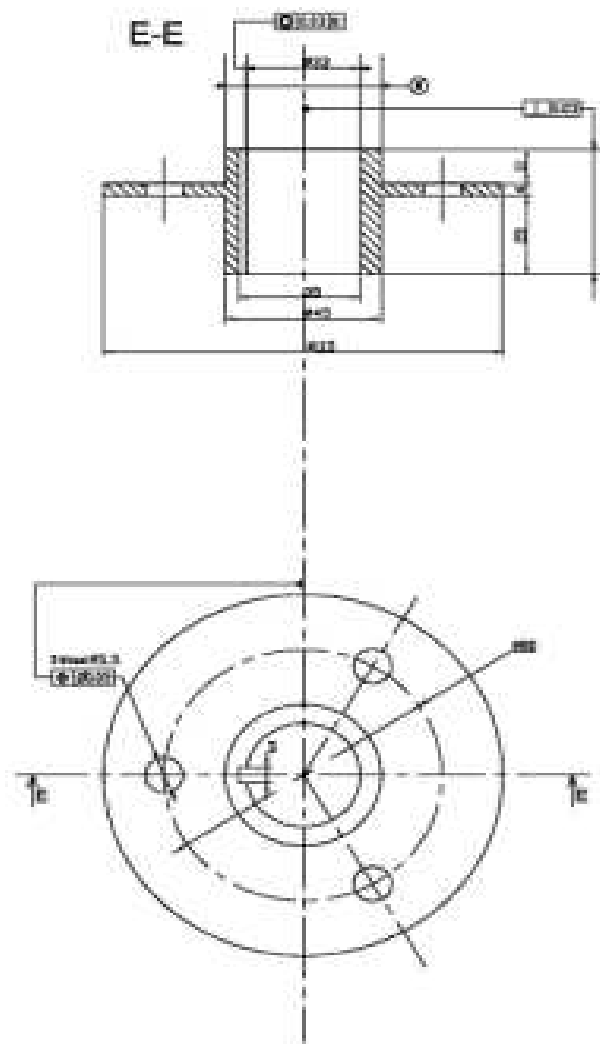
Dessiné par :
-ZAAR
-DAMI

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

A 4-H

Dessin N°

0 0



Echelle : 1:2



MOYEU

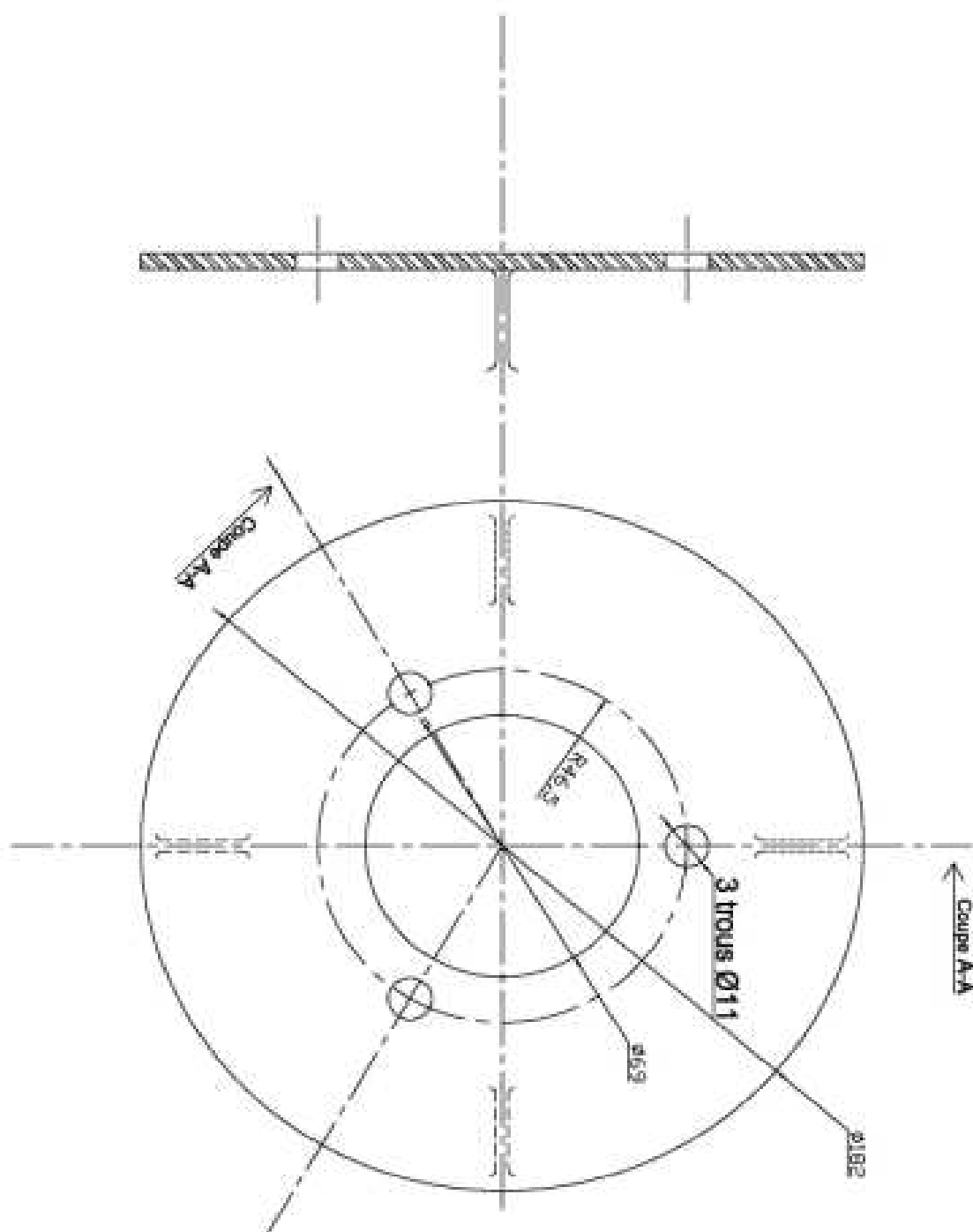
Dessiné par:
-RAMAROMANANA
-ZARAMP'IRENENA

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

A 4-V

0 0

A-A



Echelle :1:1



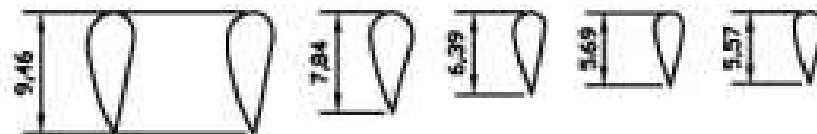
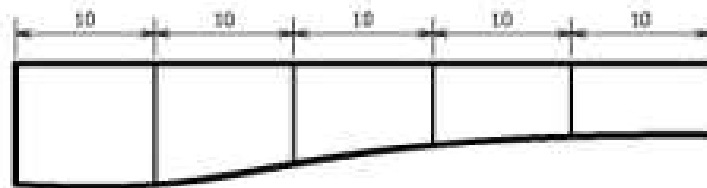
ROTOR

Dessiné
par
-ZARAMPIRENENA
-RAMAROMANANA

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

A 4-H

0 0



Echelle: 1:50



PALE

Dessiné par:
-ZARAMPIRENENA
-RAMAROMANANA

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO



TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	- 1 -
LISTE DES TABLEAUX.....	- 2 -
LISTE DES FIGURES.....	- 3 -
LISTE DES ANNEXES.....	- 4 -
LISTE DES NOTATIONS	- 5 -
INTRODUCTION	- 1 -
Partie I. GENERALITES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES	- 3 -
Chapitre I. LE VENT.....	- 4 -
1. Définition.....	- 4 -
2. Origine	- 4 -
3. Caractéristiques.....	- 4 -
3.1 Direction du vent.....	- 4 -
3.2 Vitesse du vent	- 5 -
3.3 Répartition du vent sur la surface du globe	- 11 -
3.4 . Situation environnementale et climatique à Madagascar	- 12 -
3.5 . Choix du site d'implantation de l'éolienne	- 13 -
3.6 Les sites favorables à l'éolienne à Madagascar	- 13 -
Chapitre 2. ENERGIE EOLIENNE.....	- 15 -
1. Historique.....	- 15 -
2. Les éléments constituant d'une éolienne.....	- 16 -
Chapitre 3. ETUDES THEORIQUES	- 22 -
1. Aérodynamisme	- 22 -
1.1 Théorie de Betz	- 23 -
1.2 Grandeurs caractéristiques	- 25 -
1.3 Variation de pression à travers l'éolienne	- 27 -
2. Notion sur l'aile portante	- 27 -
2.1 Définitions	- 28 -
2.2 Action de l'air sur l'aile en mouvement	- 29 -
2.3 Coefficient aérodynamique de portance, de traînée et de moment.....	- 30 -
2.4 Représentation graphique des coefficients aérodynamiques Cz et Cx.....	- 32 -
3. Aérodynamique de l'hélice	- 36 -
3.1 Caractéristiques géométriques	- 36 -
3.2 Evaluation de la vitesse relative du vent W et étude des actions aérodynamiques.....	- 37 -
3.3 Evaluation des efforts axiaux et tangentiels et calcul des couples	- 38 -

3.4	La poussée du vent sur l'hélice et le couple moteur produit.....	- 40 -
4.	Etablissement d'une relation pour le calcul de la largeur des pales.....	- 40 -
4.1	Première évaluation.....	- 40 -
4.2	Deuxième évaluation.....	- 41 -
Partie II. ETUDE DE CONCEPTION.....		- 44 -
Chapitre I. CALCUL DE LA LARGEUR DE LA PALE.....		- 45 -
1.	Choix du profil	- 45 -
1.1	Variation des coefficients en fonction de l'incidence « i »	- 47 -
1.2	Variation de l'incidence «i» en fonction de la distance à l'axe	- 47 -
1.3	Calcul de la largeur de pale	- 47 -
Chapitre 2. CALCUL DE LA PUISSANCE FOURNIE PAR L'EOLIENNE		- 49 -
1	La puissance fournie au démarrage	- 49 -
2.	La puissance fournie en régime nominal	- 49 -
Chapitre 3. VALEUR DE LA VITESSE DE ROTATION "N"		- 50 -
1.	La vitesse de rotation au démarrage.....	- 50 -
2.	La vitesse de rotation à la vitesse du vent nominale	- 50 -
Chapitre 4. EVALUATION DES EFFORTS AXIAUX ET TANGENTIAUX – CALCUL DU COUPLE MOTEUR		- 51 -
1.	La vitesse relative "W"	- 51 -
1.1	Evaluation de la vitesse relative du vent au démarrage	- 51 -
1.2	Evaluation de la vitesse relative du vent en régime nominal	- 51 -
2.	La poussée axiale et le couple moteur.....	- 51 -
2.1	Evaluation au démarrage	- 52 -
2.2	Evaluation à la vitesse du vent nominale	- 52 -
Chapitre 5. CALCUL DES PALES AU POINT DE VUE DE LA RESISTANCE DES MATERIAUX :		- 53 -
1.	Matériaux employés pour la confection des pales	- 53 -
2.	Caractéristiques mécaniques des bois	- 54 -
3.	Contraintes maximales sur les bois [Mpa]	- 55 -
4.	Façonnage de la pale.....	- 55 -
5.	Les effets gyroscopiques	- 56 -
6.	Dispositif d'orientation.....	- 58 -
6.1	Puissance recueillie sur l'empennage	- 59 -
6.1.1	. Puissance recueillie au démarrage : $V = 3[m/s]$	- 59 -
6.1.2	Puissance recueillie en régime nominal : $V = 6[m/s]$	- 59 -
Chapitre 6. DIMENSIONNEMENT DES DIFFERENTES PIECES DE L'AEROGENERATEUR.....		- 60 -
1.	Dimensionnement des éléments du moyeu	- 60 -
1.1	Axe de la pale	- 60 -

1.1.1	Fixation	- 60 -
1.1.2	. Calcul de la force centrifuge.....	- 60 -
1.1.3	. Matériau constitutif de la vis.....	- 61 -
1.1.4	. Détermination des dimensions de la vis de fixation	- 61 -
2.	Multiplicateur.....	- 62 -
2.1	Dimensionnement des poulies courroies.....	- 63 -
	les caractéristiques du rotor en régime nominal	- 63 -
2.1.2	Calcul de la vitesse de rotation n_2	- 63 -
2.1.3	Les diamètres primitifs.....	- 64 -
2.1.4	Choix du profil de la courroie	- 64 -
2.1.5	Entraxe	- 64 -
2.1.6	Longueur de la courroie	- 65 -
2.1.7	Augmentation ou diminution de l'entraxe.....	- 65 -
2.1.8	Vitesse de la courroie	- 65 -
2.1.8	Fréquence de flexion : f_b	- 66 -
3.	CARTER- COUVERCLE.....	- 66 -
3.1	Carter couvercle du multiplicateur	- 66 -
3.2	Rôles du carter couvercle.....	- 66 -
3.3	Fixation du carter	- 67 -
3.3.1.	Le diamètre de vis de fixation : d_v	- 67 -
3.3.2.	Hauteur du bossage par rapport à la base : δ_6	- 67 -
3.3.3.	Le diamètre de vis de serrage carter couvercle : d_{v2}	- 67 -
3.3.4.	Couvercle de la nacelle.....	- 67 -
4	EMPENNAGE	- 68 -
4.1	Dispositif d'orientation.....	- 68 -
4.2	Calcul de la surface du gouvernail.....	- 69 -
4.3	Calcul des coordonnées du centre de gravité du gouvernail	- 70 -
4.4	Confection du gouvernail	- 72 -
5.	PLATEAU	- 72 -
6.	ALTERNATEUR	- 73 -
6.1	Caractéristiques.....	- 73 -
6.1.1	Définition.....	- 73 -
6.1.2	Caractéristiques de base	- 73 -
6.1.3	Caractéristiques de charge	- 74 -
6.1.4	Caractéristiques numériques	- 77 -
	Partie III. REALISATION ET EVALUATION ECONOMIQUE	- 78 -

Chapitre 1. REALISATION.....	- 79 -
1. HELICE : façonnage.....	- 79 -
2. L'ARBRE	- 81 -
3. MULTIPLICATEUR	- 81 -
4. BATTERIES	- 82 -
5. DISPOSITIF DE CONTROLE	- 82 -
6. UTILISATION	- 82 -
7. ESSAIS.....	- 83 -
Chapitre 2. EVALUATION ECONOMIQUE	- 85 -
1. Devis estimatif et quantitatif du projet.....	- 85 -
2. Coût de l'équipement principal :.....	- 87 -
3. Estimation des autres investissements :	- 87 -
4. L'investissement total du projet :	- 87 -
5. Calcul du flux net de trésorerie (FNT) ou cash flow	- 87 -
5.1 Calcul du gain énergétique équivalent en électricité en une journée	- 88 -
5.2 Le coût économisé par jour d'électricité :.....	- 88 -
6. Calcul de la valeur actuelle nette (van) et taux de rentabilité interne (TRI)	- 90 -
6.1 Calcul de la VAN à 15% :.....	- 90 -
6.2 Calcul de la VAN à 20% :.....	- 91 -
7. Détermination du temps de remboursement ou POT (Pay Out Time)	- 91 -
CONCLUSION.....	92
BIBLIOGRAPHIE	93
ANNEXES	94

RESUME

L'énergie éolienne est une source d'énergie électrique en plein développement dans le monde.

Dans les zones rurales, le taux d'accès à l'électricité est inférieur à 2% à cause de leur éloignement ainsi que le coût de transport et de la distribution de l'énergie. Ainsi, pour avoir l'électricité chez soi, les familles doivent acheter à la fois le système de production de l'électricité et les appareils d'usage. L'énergie éolienne est une source d'électricité qui va diminuer le budget en électricité des familles en milieu rural.

L'installation d'éolienne en milieu rural s'avère efficace mais avant son installation, des calculs et études préalables seraient indispensables.

Mots clés : Mini-aérogénérateur, vent, pale, multiplicateur, alternateur, empennage.

ABSTRACT

The wind power is an electric source of energy which is developing a lot in the world.

In the rural zones, the rate of access to electricity is lower to 2% because of their distance as well as and the distribution cost of transport of energy. So, to have electricity at home, families must buy at the same time the system of production of electricity and the devices of use. The wind power is a source of electricity which will decrease the budget in electricity of the families in rural environment.

The wind power installation in a rural area proves to be efficient but before is installation, calculation and prior studies would be necessary.

Key words: Mini-aero generator, wind, pale, multiplier, alternator, empennage.

Nombre de page : 94

Nombre de figure : 33

Nombre de tableaux : 13

Encadreur :

Madame ARISOA RIVAH Kathy

Monsieur RANDRIANJA Roger

ZARAMPIRENENA

Ratolojanahary

Tél : 032 02 711 15

RAMAROMANANA

Itovimirantosaina Navalonitrinozafy

Tél : 033 14 287 19