

Conception d'un aérogénérateur à axe vertical fabricable par des techniques de prototypage rapide

Mémoire présenté par
Marie DONNAY , Quentin LALLEMAND

en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur civil mécanicien & électromécanicien

Promoteurs
Philippe CHATELAIN, Bruno DEHEZ

Lecteurs
Emmanuel DE JAEGER, Hervé JEANMART

Année académique 2015-2016

Abstract

La disparition progressive des énergies fossiles et les objectifs de réductions des émissions de CO_2 amènent à une exploitation grandissante des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'utilisation de l'énergie éolienne ne cesse de se développer et en particulier les éoliennes de petite échelle à axe vertical, plus adaptées pour des applications domestiques. Par ailleurs, la démocratisation des techniques de prototypage rapide due à l'apparition de fablab permet maintenant à chacun de créer ses propres objets. L'objectif principal de ce travail est de construire un modèle réduit complet d'éolienne en utilisant ces techniques innovantes de prototypage rapide.

Nous avons implémenté une méthode numérique évaluant les performances théoriques d'éoliennes à axe vertical afin de sélectionner le type de rotor et les dimensions des pales. Sur cette base nous avons proposé un prototype de trois pales ayant une forme de troposkine à caractère hélicoïdal. Les dimensions principales sont une hauteur de 60 *cm* et un rayon maximal de 30 *cm*. L'entièreté des pièces du rotor a été dimensionnée puis fabriquée dans le FabLab de l'UCL, à l'exception de quelques pièces standardisées telles que les roulements et l'axe central.

Après montage, l'ensemble a été couplé à un générateur Maxon et testé en soufflerie. Les résultats expérimentaux divergent des prévisions théoriques. Nous avons identifié plusieurs causes pouvant justifier ce comportement inattendu, tels que des frottements trop importants et un effet de courbure du profil.

Enfin, une approche économique a été développée afin d'évaluer le potentiel commercial de cette technologie. Cette analyse conclut à la pertinence d'une poursuite des recherches.

En conclusion, au travers de ce travail nous avons démontré qu'il est possible de construire une éolienne en combinant des pièces de prototypage

rapide et des composants standards. Ce premier prototype constituera une base pour des recherches plus approfondies en vue d'optimiser les performances.

Remerciements

Avant toute chose, nous souhaitons remercier toutes les personnes qui nous ont soutenus et aidés cette année afin que nous puissions mener à bien ce projet.

Nous adressons nos sincères remerciements à nos promoteurs, les Professeurs Bruno Dehez et Philippe Chatelain pour nous avoir consacré leur temps et guidés tout au long de ce travail avec leurs conseils avisés, leurs connaissances et leur esprit critique.

En plus de nos promoteurs nous tenons à remercier Matthieu Duponcheel et Denis-Gabriel Caprace du pôle TFL pour leur disponibilité tout au long de l'année et les réponses qu'ils ont pu fournir à toutes nos interrogations et qui ont contribué à l'accomplissement de ce mémoire.

Nous sommes également reconnaissants envers Julien Vervotte et Frank Hesbois qui travaillent au laboratoire aérodynamique pour l'aide précieuse qu'ils nous ont fournie lors de la phase expérimentale de ce travail.

Le prototype n'aurait pas su voir le jour sans Régis Lomba, responsable du Makilab, qui nous a accordé sa confiance et donné accès au fablab en dehors des heures d'ouverture afin que nous puissions utiliser l'imprimante 3D ainsi que la découpeuse laser à notre guise.

Nous remercions en outre Innovus, une compagnie liée à l'université de Stellenbosch en Afrique du Sud, et plus particulièrement Monsieur Johnathan Smit, de nous avoir accueillis et aidés pour des recherches portant sur les aspects de commercialisation de notre projet.

Nous tenons à remercier tout particulièrement nos familles et amis proches pour nous avoir toujours soutenus et encouragés durant toutes ces années d'études.

Table des matières

Liste des figures	i
Liste des tables	v
Liste des symboles et abréviations	vii
Introduction	1
1 Aspects aérodynamiques	5
1.1 Éoliennes à axe vertical	5
1.1.1 Avantages et inconvénients	6
1.1.2 Classification des VAWT	6
1.2 Quelques généralités	11
1.2.1 Puissance	11
1.2.2 Paramètres caractérisant les VAWT	11
1.3 Méthode "Double Multiple Streamtube"	16
1.3.1 Surface actuatrice	16
1.3.2 Principe de la "Double Multiple Streamtube Method"	18
1.3.3 Expansion des tubes de courant	19
1.3.4 Calcul du facteur d'induction	22
1.3.4.1 Vitesse relative	22
1.3.4.2 Angle d'attaque	25
1.3.4.3 Forces appliquées à la pale	26
1.3.4.4 Coefficient de poussée d'une surface actuatrice	28
1.3.4.5 Équation transcendante pour le facteur d'induction	28
1.3.5 Calcul du couple et de la puissance	30
1.4 Décrochage aérodynamique	31
1.4.1 Phénomène de décrochage	31
1.4.2 Décrochage dynamique	32
1.4.2.1 Modélisation du décrochage dynamique	33
1.4.3 Extension de la polaire	35

1.5	Analyse paramétrique	37
1.5.1	Influence de la solidité	37
1.5.2	Influence du type de rotor	39
1.6	Design des pales	40
1.6.1	Choix du profil	40
1.6.2	Choix du rotor	41
1.6.2.1	Limitations	42
1.6.2.2	Pré-dimensionnement	44
1.6.2.3	Ligne portante	45
1.6.2.4	Corde	45
1.6.3	Résumé	48
2	Design et dimensionnement	49
2.1	Axe de rotation	50
2.1.1	Dimensionnement statique	52
2.1.1.1	Contraintes	53
2.1.1.2	Coefficients de concentration de contraintes et de sécurité	56
2.1.1.3	Valeurs numériques	58
2.1.2	Dimensionnement en fatigue	58
2.1.3	Dimensionnement au flambement	63
2.2	Pales	64
2.3	Plateaux	66
2.4	Roulements	68
2.4.1	Critères de choix	68
2.4.2	Montage	69
2.4.3	Dimensionnement	71
2.5	Générateur	74
3	Procédés de prototypage rapide	77
3.1	Impression 3D	77
3.1.1	Méthode: Fused deposition modeling	78
3.1.2	Matériaux	79
3.1.3	Imprimantes à disposition	80
3.1.4	Paramètres d'impression	81
3.2	Découpeuse laser	84
4	Générateur électrique	85
4.1	Configuration	86
4.2	Dimensionnement	89
4.2.1	Paramètres	90

4.2.1.1	La fréquence électrique	91
4.2.1.2	Flux magnétique	92
4.2.1.3	Bobinage	93
4.2.2	Contraintes	94
4.2.3	Résultats	95
4.3	Générateur utilisé	97
5	Résultats expérimentaux	99
5.1	Soufflerie	99
5.2	Installation électrique	101
5.2.1	Redresseur	101
5.2.2	Hacheur	102
5.2.3	<i>dSPACE/Simulink</i>	105
5.3	Résultats	106
5.3.1	Analyse des couples	107
5.3.2	Prise en compte de la cambrure virtuelle	110
6	Étude commerciale	115
6.1	Business model	115
6.2	Évaluation	119
	Conclusions	121
A	Résultats en soufflerie	125
A.1	Mesures de vitesse de vent	125
B	Fiches techniques	127
C	Business Model Canvas	137
D	Évaluation commerciale de la technologie	139
E	Brochure marketing	145
	Références	151

Liste des figures

1	Prédictions sur la production d'électricité dans le monde d'ici 2035[7]	1
2	Accès à l'électricité dans le monde [2]	2
1.1	Évolution du rendement aérodynamique en fonction de la vitesse spécifique et du type d'éolienne	7
1.2	Éolienne de type Savonius	8
1.3	Force de traînée	8
1.4	Éoliennes de type Darrieus	9
1.5	Force de portance	10
1.6	Éolienne hybride	10
1.7	VAWT à trois pales en troposkine avec caractère hélicoïdal	12
1.8	Troposkine avec $a = 0.3$ $b = 0.325$ et parabole	14
1.9	Tube de courant passant à travers une surface actuatrice [35]	17
1.10	Double tube de courant avec surfaces actuatrices en tandem [35]	19
1.11	Méthode DMST avec expansion des tubes de courant [35]	20
1.12	Paramètres pour l'expansion des tubes de courant [35]	22
1.13	Paramètres caractéristiques de l'écoulement autour du profil [35]	23
1.14	Pale hélicoïdale: la seule composante de la vitesse relative à considérer est celle qui est orthogonale à la ligne portante [19]	24
1.15	Variation de la vitesse relative sur une rotation en fonction du type de rotor	24
1.16	Variation de l'angle d'attaque sur une rotation en fonction du type de rotor	25
1.17	Forces appliquées au profil [35]	26
1.18	Illustration du repère dans le plan du profil	27
1.19	Coefficient de portance pour un profil NACA0015 et un nombre de Reynolds de 75000.	31
1.20	Phénomène de décrochage	32
1.21	Illustrations du phénomène de décrochage dynamique [33]	33
1.22	Comportement d'un profil sous l'effet du décrochage dynamique [18]	34
1.23	Extension de la polaire pour un profil NACA0015 et un nombre de Reynolds de 10^6	36

1.24	Influence de l'extension de la polaire et du décrochage dynamique sur le facteur d'induction	36
1.25	Influence de la solidité sur le coefficient de puissance	37
1.26	Angle d'attaque pour différentes vitesses spécifiques, $\sigma = 0.4$	38
1.27	Influence du type de rotor sur le coefficient de puissance	39
1.28	Profil aérodynamique NACA0015	40
1.29	Design de l'éolienne	41
1.30	Courbes de troposkine en fonction de b	45
1.31	Performances de chaque morceau de pale infinitésimal et pour une vitesse de vent de 10 m/s	47
1.32	Performances globales du rotor	48
2.1	Structure de l'éolienne complète	50
2.2	Vue éclatée et assemblage réalisé entre la tige filetée et le disque en bois	51
2.3	Schéma des différentes forces agissant sur l'axe	53
2.4	Diagramme des efforts internes. Effort tranchant et moment de flexion subis par l'axe en fonction de la position le long de ce dernier . .	54
2.5	Effet de la force centripète	56
2.6	Caractéristiques géométriques d'une barre cylindrique avec rainure circonférentielle en forme de V [30]	57
2.7	Illustration des notations utilisées pour les contraintes fluctuantes . .	59
2.8	Courbes de sensibilité aux entailles	60
2.9	Diagramme de Haigh	61
2.10	Réduction de la limite d'endurance due à la finition de surface pour les aciers	62
2.11	Droites des contraintes représentées sur le diagramme de Haigh	62
2.12	Flambement d'une poutre soumise à une compression entre deux liaisons pivots	63
2.13	Représentations de l'assemblage entre les pales et le plateau à l'aide de tiges filetées, avec A: la pale, B: l'axe de rotation, C: le plateau, D: une pièce imprimée en 3D pour guider les tiges filetée, E: les tiges filetée M3, F: les écrous M3 et G: les passages des tiges filetées dans la pale	64
2.14	Principe d'assemblage entre les différentes sections de pale	65
2.15	Déplacements et contraintes calculés par <i>Solidworks simulation</i>	67
2.16	Ajustement des roulements	70
2.17	À gauche : l'assemblage effectué au niveau des roulements, à droite : les plans des deux supports	70
2.18	Roulement rigide à billes à une rangée SKF 6004 [32]	71
2.19	Roulement à rouleaux cylindriques SKF NU 204 ECP [32]	71

2.20	À gauche : vue éclatée de l'assemblage du générateur, à droite : coupe de la pièce d'accouplement imprimée en 3D	74
3.1	Procédé "Fused Deposition Modeling" - [Annexe B]	78
3.2	Imprimantes 3D	80
3.3	Décollement partiel lors d'une impression	81
3.4	Différentes densités de remplissage de la <i>Up mini</i> [36]	83
4.1	Configurations basiques des machines à flux axial et aimants permanents: (a) simple face avec encoches, (b) double face avec encoches à stator interne et deux rotors à aimants permanents, (c) double face à stator avec encoches et rotor interne à aimants permanents, (d) double face sans noyau à stator interne. 1- noyau statorique, 2- bobinage du stator, 3- rotor, 4- aimant permanent, 5- culasse, 6- roulement, 7- arbre [22]	87
4.2	Machine à aimants permanents et flux axial à stator interne et double rotor externe (a) vue d'ensemble, (b) stator, (c) rotor, 1- aimants permanents, 2- disque du rotor, 3- pôles du stator, 4- Bobinages [22] .	88
4.3	Configuration de Halbach [22]	88
4.4	Représentation du stator: en bleu le support imprimé en 3D et en rouge le bobinage en fils de cuivre	89
4.5	Schéma de connexion de l'aérogénérateur à une batterie	89
4.6	Dimensions du générateur	90
4.7	Combinaisons du nombre de bobines S et de pôles $2p$ pour des machines triphasées à bobinages concentrés équilibrés [20]	91
4.8	Réseau de Halbach cartésien [22]	92
4.9	Représentation des différentes résistances thermiques	94
4.10	Représentation d'un bobinage	95
4.11	Représentation du générateur et du réducteur [27]	97
5.1	Positions des différents points de mesures pour la méthode log-Tchebycheff	100
5.2	Représentation du phénomène de blocage: à gauche le cas d'une veine d'essais ouverte et à droite celui d'une veine d'essais fermée	101
5.3	Représentation schématique de l'installation électrique utilisée au laboratoire.	102
5.4	Montage d'un redresseur triphasé double alternance à diodes (a) et graphe de l'évolution des tensions dans le redresseur (b)	103
5.5	Tension de sortie sans et avec condensateur (courbe rouge)	103
5.6	Schéma électrique d'un convertisseur boost	103
5.7	Vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent	106

5.8	Couple théorique en fonction de la vitesse de rotation pour un vent de 10 m/s	107
5.9	Vitesse de rotation du rotor en fonction du temps pour différentes vitesses de vent	108
5.10	Couples en fonction de la vitesse de rotation pour un vent de 10 [m/s]	109
5.11	Cambrure virtuelle résultante d'un écoulement en rotation	110
5.12	Convention pour le décalage azimuthal	111
5.13	Influence de l'effet de courbure sur le coefficient de puissance	112

Liste des tables

1.1	Contraintes de design	43
1.2	Pré-dimensionnement du rotor	44
1.3	Caractéristiques finales de l'éolienne	48
2.1	Caractéristiques des tiges filetées [5]	51
2.2	Types de roulements et caractéristiques	69
3.1	Caractéristiques des imprimantes 3D disponibles	80
3.2	Comparaisons des différentes densités pour l'impression d'un cube de 30 <i>mm</i> de côté	83
3.3	Paramètres de découpe pour du MDF	84
4.1	Caractéristiques principales du générateur et de son réducteur	98
5.1	Fréquences et vitesses de vent correspondantes	101
A.1	Mesures des vitesses de vent en fonction de la fréquence	126

Liste des symboles et abréviations

Symbole	Description	Unité
Lettres latines		
a	Facteur d'induction	—
A	Aire balayée par le rotor	m^2
AR	Aspect ratio	—
B	Densité de flux magnétique	T
c	Corde	m
$C_{p,q}$	Coefficient de puissance, de couple	—
$C_{L,D}$	Coefficient de portance, de trainée	—
d	Diamètre	m
D	Force de trainée	N
E	Module de Young, force électromotrice	$N/m^2, V$
f	Fréquence	Hz
F	Force	N
h	Hauteur du rotor	m
h_m	Hauteur des aimants	mm
I	Intensité	A
J	Moment d'inertie	kgm^2
k_r	Rapport de réduction	—
k_T	Constante de couple	mNm/A
k_w	Constante de vitesse	rpm/V
k_{sec}	Coefficient de sécurité	—
K	Coefficient de concentration de contraintes	—
l	Longueur d'une pale, longueur de flambement	m
L	Force de portance	N
m	Masse	kg
M	Moment fléchissant	N/m^2
n	Nombre de fragments par pale	—
n_ϕ	Nombre de phases	—

N	Nombre de pales	—
p	Pression, nombre de paires de pôles	$Pa, —$
P	Puissance	W
q	Sensibilité aux entailles	—
Q	Couple, chaleur	Nm, W
R	Rayon	m
Re	Nombre de Reynolds	—
S	Nombre de bobinage	—
S_n	Limite d'endurance	MPa
S_u	Limite de rupture	MPa
t	Profondeur d'entaille	mm
t_w	Épaisseur du bobinage	mm
T	Poussée, effort tranchant	$N, N/m^2$
U	Vitesse du sillage	m/s
V	Tension	V
V_∞	Vitesse infini amont	m/s
w_c	Largeur du bobinage	mm
W	Vitesse relative à la pale	m/s

Lettres grecques

α	Angle d'attaque	$^\circ$
δ	Pente de la troposkine	$^\circ$
η	Rendement	—
Λ	Angle de sweep	$^\circ$
λ	Vitesse spécifique (TSR)	m/s
ω	Vitesse angulaire	rad/s ou rpm
ψ	Orientation des tubes de courant	$^\circ$
ρ	Densité, rayon d'entaille	$kg/m^3, mm$
σ	Solidité, contraintes de flexion et de compression	—, MPa
σ_{LE}	Limite d'élasticité	MPa
τ	contraintes de torsion et de cisaillement	MPa
θ	Angle azimutal, rapport cyclique	$^\circ, —$

Abréviations

CAO	C onception A ssistée par O rdinateur
DC	D irect C urrent
DMST	D ouble M ultiple S tream t ube
FDM	F used D eposition M odeling

HAWT	H orizontal A xis W ind t urbine
MDF	M edium l D ensity F iberboard
MPPT	M aximum P ower P oint T racking
TSR	T ip S peed R atio
VAWT	V ertical A xis W ind t urbine

Introduction

Contexte

L'un des enjeux majeurs de l'époque actuelle concerne le secteur de l'énergie. En effet, notre planète possède des ressources énergétiques fossiles limitées et celles-ci s'épuisent terriblement. De plus, l'utilisation de ces ressources entraîne un effet néfaste sur l'environnement dû à l'importante production de dioxyde de carbone. Tout cela engendre une prise de conscience grandissante menant à la recherche de solutions alternatives permettant de répondre à nos besoins énergétiques sur le long terme. Selon les estimations, il resterait entre 40 et 60 années d'existence pour le pétrole, environ 70 pour le gaz naturel et 2 siècles pour le charbon. Il est donc primordial que la génération d'aujourd'hui trouve des méthodes innovantes afin d'exploiter l'immense potentiel d'énergie renouvelable que la nature a à nous offrir. Celle-ci est une source fiable, rentable et omniprésente sur Terre sous diverses formes.

L'énergie éolienne, par exemple, connaît aujourd'hui un essor majeur. Il s'agit d'une énergie inépuisable, propre et sans émission de gaz à effet de serre. D'après l'IEA (International Energy Agency [7]) l'énergie éolienne a un énorme potentiel et son exploitation ne va cesser d'augmenter pendant que l'utilisation des énergies fossiles va s'amoinrir (voir figure 1).

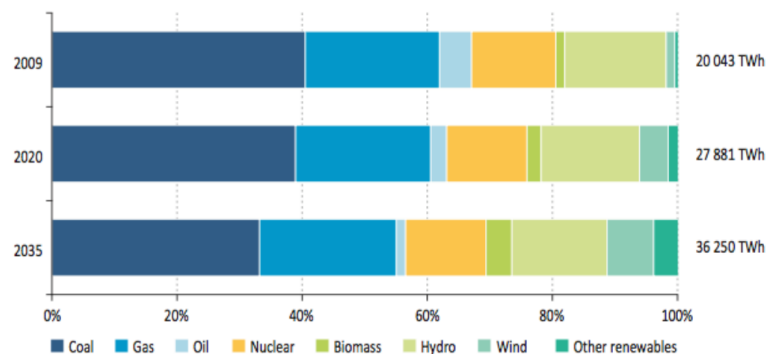


Figure 1: Prédictions sur la production d'électricité dans le monde d'ici 2035[7]

Les éoliennes peuvent être implantées localement, ce qui leur permet de pouvoir répondre à des besoins électriques de masse tout comme à des besoins domestiques limités, selon leur taille. Un grand nombre de recherches ont été menées au sujet des éoliennes de grande taille à axe horizontal et en particulier sur les parcs éoliens offshore étant donné que ces installations sont celles qui produisent le plus d'énergie. Cette technologie ne cesse de se perfectionner au fil des années et devient de plus en plus puissante et silencieuse. En revanche, peu d'études ont été menées sur des turbines de petite taille et encore moins sur celles à axe vertical. Ce type d'éolienne est pourtant plus approprié pour des applications domestiques de faible puissance et permet une production décentralisée. En outre, les éoliennes à axe vertical ont l'avantage de s'insérer parfaitement en milieu urbain, comme par exemple sur le toit des bâtiments.

Par ailleurs, certaines régions du monde ont un accès limité, voire inexistant, à l'électricité (voir figure 2). En effet, dans les pays en voie de développement comme en Afrique ou dans quelques régions d'Asie, certaines communautés ne sont pas reliées au réseau électrique. Pour les villages implantés dans des régions géographiques reculées, il serait dès lors plus rentable d'utiliser des dispositifs de petite échelle et indépendants du réseau plutôt que de construire d'immenses infrastructures qui les relieraient au réseau. Les petites éoliennes à axe vertical représentent ici une opportunité qu'il est intéressant d'étudier.

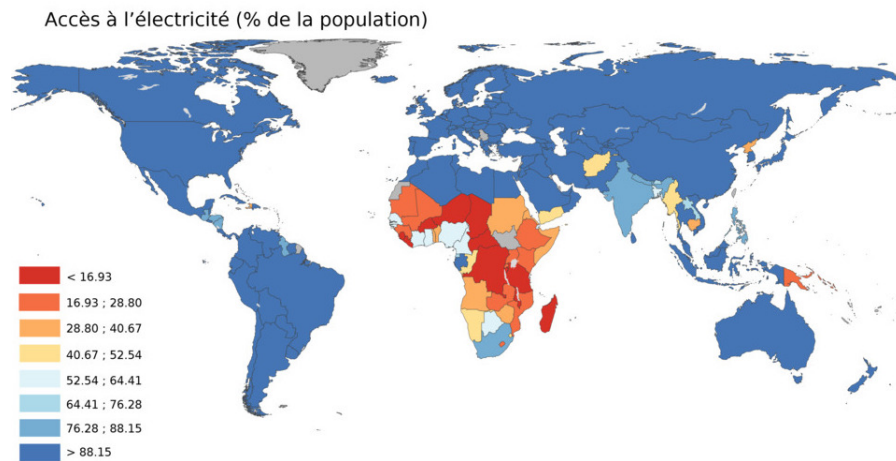


Figure 2: Accès à l'électricité dans le monde [2]

Afin que ces éoliennes puissent être disponibles aux quatre coins de la planète, nous avons décidé d'utiliser les nouvelles technologies de prototypage rapide pour les fabriquer. L'un de ces procédés est l'impression 3D ou fabrication additive. Il

s'agit d'une technique de fabrication offrant de nouvelles possibilités de conception et dont le principal avantage réside dans le fait que son utilisation ne nécessite pas de compétences techniques particulières. De plus, avec l'apparition des fablab¹ dans les universités, cette technologie devient de plus en plus accessible. Un fablab est un espace ouvert au public dans lequel sont mis à disposition plusieurs outils pour la fabrication d'objets en tout genre. Ceux-ci disposent, entre autres, d'imprimantes 3D qui permettent de créer un objet simplement à partir d'un modèle numérique 3D.

Dès lors, une éolienne fabriquée majoritairement par impression 3D et nécessitant uniquement l'achat de composants standards pourrait être beaucoup plus accessible qu'une éolienne classique. Le faible coût du matériau utilisé par l'imprimante auquel s'ajoute le coût d'achat des différents composants supplémentaires rendrait ce dispositif encore plus attrayant pour les pays en voie de développement. En outre, toute personne désireuse de réduire son empreinte écologique pourrait également être attirée par cette technologie.

Objectifs

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est de concevoir et construire une petite éolienne à axe vertical qui puisse être répliquée partout dans le monde. Pour la fabriquer nous utiliserons exclusivement du prototypage rapide tel que l'impression 3D et la découpe par laser. L'un des enjeux est donc de réussir à tirer profit des possibilités qu'offrent ces techniques de fabrication innovantes en concevant les pièces différemment. Nous nous permettons en outre l'achat de composants standards tels que des tiges filetées, écrous, roulements, etc. dont nous sommes certains de la disponibilité dans les pays en voie de développement.

Il faudra également concevoir un générateur adapté à cette éolienne et fabriquable par prototypage rapide. Cette partie restera cependant purement théorique.

Une fois la conception terminée, il s'agira de tester le dispositif en soufflerie afin d'évaluer ses performances réelles. Pour ce faire nous emploierons alors un moteur Maxon utilisé comme générateur.

Ce travail nécessite par conséquent d'étudier plusieurs aspects comme l'aérodynamique, la conception mécanique et l'électricité.

L'aspect aérodynamique de l'éolienne est détaillé dans le premier chapitre en commençant par un état de l'art des différents types d'éoliennes à axe vertical existants. La méthode implémentée pour étudier les performances de l'éolienne est

¹Contraction de l'anglais: fabrication laboratory

ensuite exposée et suivie d’une explication du phénomène de décrochage dynamique. Cette méthode permet dans la suite de faire une analyse paramétrique et de convenir sur une géométrie pour le rotor.

La partie conception mécanique est développée dans le deuxième chapitre. On y présente les assemblages des différents composants ainsi que leur dimensionnement. L’axe de rotation est dimensionné en premier lieu et suivi par le renforcement des pales, les plateaux, les roulements et enfin l’accouplement avec le générateur.

Les différentes imprimantes 3D que nous avons à disposition sont comparées dans le troisième chapitre, de même que les matériaux utilisés par chacune d’entre elles. Ceci permettra d’évaluer l’imprimante qui correspond le mieux à la fabrication d’une éolienne. Les paramètres d’impression 3D sont détaillés avant de présenter la découpeuse laser.

Le quatrième chapitre présente dans un premier temps la conception théorique d’un générateur adapté à notre éolienne et en particulier le dimensionnement des bobinages et des aimants. Viennent ensuite les caractéristiques du moteur Maxon utilisé lors des tests.

Les tests expérimentaux réalisés en soufflerie sont repris dans le cinquième chapitre. Le dispositif de test y est tout d’abord expliqué et suivi ensuite par les résultats et leur analyse.

Le sixième et dernier chapitre reprend une étude commerciale de la technologie développée. Celle-ci a été réalisée avec l’aide d’Innovus, une compagnie d’innovation liée à l’université de Stellenbosch en Afrique du Sud. Cette analyse comprend un business model ainsi qu’une évaluation de la technologie.

Une conclusion sur ce travail est présentée à la fin de ce rapport dans laquelle sont reprises différentes pistes d’améliorations pour des investigations futures.

Chapitre 1

Aspects aérodynamiques

Afin de dimensionner le rotor d'une éolienne il est essentiel d'étudier les aspects aérodynamiques des éoliennes à axe vertical et d'établir une méthode permettant d'évaluer leurs performances. Ce chapitre présente toute l'étude aérodynamique réalisée dans cet objectif.

Tout d'abord, un état de l'art des différents types d'éoliennes à axe vertical existants est exposé, présentant les avantages et inconvénients de chacun. La deuxième partie détaille par la suite tous les paramètres généraux caractérisant ce type d'éoliennes. La méthode de modélisation numérique utilisée dans ce travail est ensuite exposée, suivie d'une explication sur le phénomène de décrochage dynamique. Une analyse paramétrique des performances des éoliennes à axe vertical est présentée avant d'expliquer le choix final de design.

Dans ce chapitre, la hauteur d'une pale est notée h , sa longueur l , la corde c et le rayon du rotor R .

1.1 Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes sont des dispositifs permettant de récupérer l'énergie du vent sous forme d'électricité. Le vent, ayant une certaine énergie cinétique, exerce une force sur le rotor qui transforme cette énergie en énergie mécanique. Celle-ci est ensuite convertie en énergie électrique via un générateur. Dans le cas d'une éolienne à axe vertical, également appelée VAWT¹, l'arbre de rotation est placé verticalement et est donc perpendiculaire à la direction du vent.

¹Vertical Axis Wind Turbine

1.1.1 Avantages et inconvénients

Le principal avantage des VAWT est qu'elles sont indépendantes de l'orientation du vent. Elles ont ainsi une réponse plus rapide aux changements de direction du vent que les éoliennes à axe horizontal, ou HAWT¹, qui nécessitent un mécanisme supplémentaire afin d'orienter le rotor perpendiculairement au vent incident.

De plus, les différents composants peuvent être montés au niveau du sol. Ceci offre tout d'abord un avantage pour la simplicité de construction et de maintenance, en comparaison aux HAWT où la maintenance doit se faire en haut de l'éolienne. Aussi, la charge que doit supporter le mât central est par conséquent plus faible, réduisant ainsi les efforts s'appliquant sur celui-ci.

Les VAWT sont en outre très silencieuses en comparaison à leurs homologues horizontales car elles fonctionnent à des vitesses de rotation optimales plus faibles, ce qui leur confère un atout supplémentaire.

En revanche, les HAWT sont plus efficaces que les VAWT ce qui explique pourquoi elles sont beaucoup plus répandues. La figure 1.1 présente les courbes de coefficients de puissance de plusieurs types d'éoliennes et illustre bien que les éoliennes à axe horizontal sont les plus performantes. En plus d'être moins efficaces, les VAWT capturent généralement des vents ayant des puissances inférieures aux vents capturés par les HAWT. En effet, les éoliennes à axe vertical sont ordinairement placées plus proches du sol et captent alors une plus faible quantité de vent car celui-ci est plus turbulent et plus lent à proximité du sol.

Contrairement aux HAWT, certaines VAWT ont le désavantage de ne pas démarrer automatiquement et de nécessiter un mécanisme d'auto-démarrage.

1.1.2 Classification des VAWT

Les VAWT se divisent généralement en deux catégories: celles dont le principe de fonctionnement repose sur la force de traînée et celles qui utilisent la portance.

Savonius

Les éoliennes de type Savonius fonctionnent principalement grâce à la force de traînée. Elles sont le plus souvent composées de deux demi-pales cylindriques disposées en "S" comme représenté sur la figure 1.2. Elles fonctionnent comme un anémomètre avec la particularité que le vent peut passer d'un godet à l'autre. Sur

¹Horizontal Axis Wind Turbine

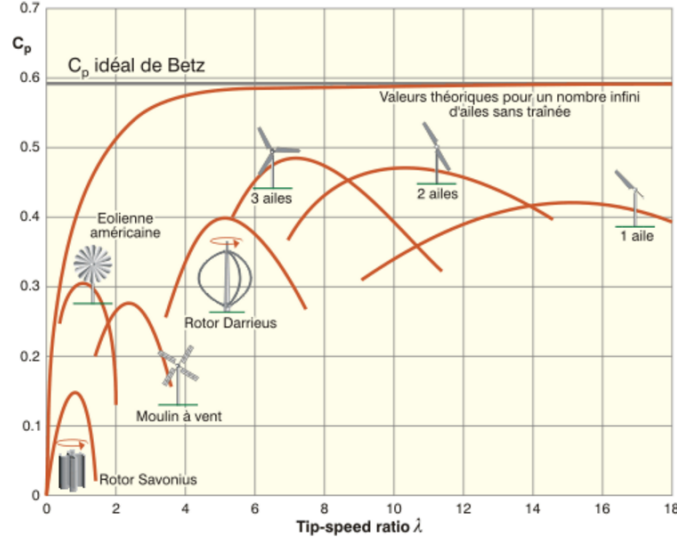


Figure 1.1: Évolution du rendement aérodynamique en fonction de la vitesse spécifique et du type d'éolienne

le graphe de la figure 1.1, l'éolienne Savonius apparaît comme étant la moins performante de toutes et est donc généralement utilisée pour des applications de faibles puissances. Ces éoliennes sont capables de démarrer automatiquement, ce qui est leur plus grand avantage. De plus, étant donné leur solidité élevée, elles ne nécessitent pas d'être fabriquées avec une grande précision.

La force de traînée est parallèle à l'écoulement et dirigée dans le même sens que celui-ci. La manière la plus simple d'illustrer cette force est de considérer un élément en translation sous l'effet du vent. Celui-ci peut représenter un élément de pale infinitésimal d'une éolienne en rotation guidée par la force de traînée. Ceci est illustré sur la figure 1.3.

Soient ρ la densité de l'air, V_∞ la vitesse du vent, v la vitesse de translation de la pale, C_D le coefficient de traînée et S la surface projetée de l'élément, l'expression de la force de traînée est alors la suivante:

$$D = \frac{1}{2}\rho(V_\infty - v)^2 C_D S \quad (1.1)$$

où $(V_\infty - v)$ représente la vitesse relative de l'élément.

Le coefficient de traînée pour une surface concave est supérieur à celui d'une surface convexe, ce qui force donc le rotor d'une éolienne de type Savonius à tourner.

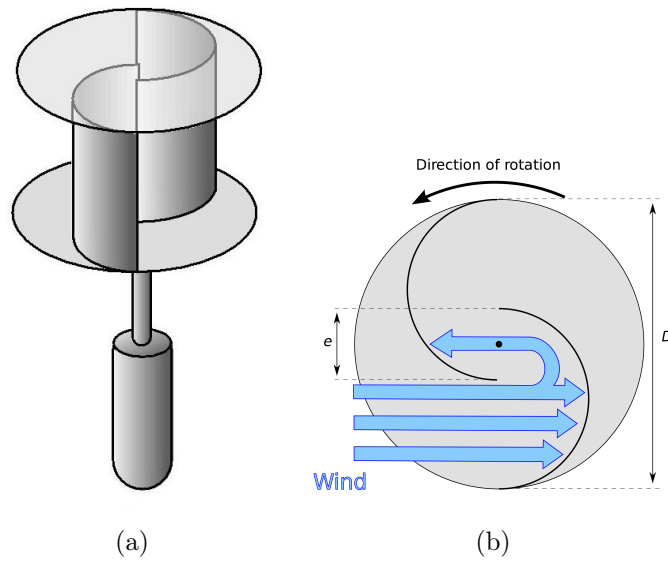


Figure 1.2: Éolienne de type Savonius

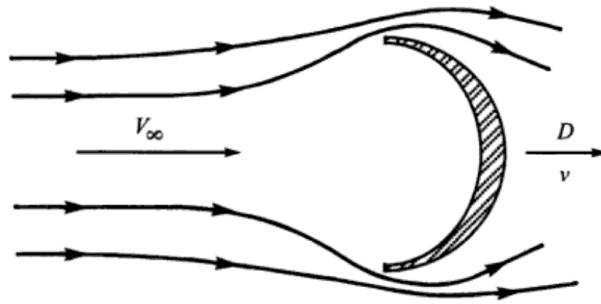


Figure 1.3: Force de traînée

Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus, quant à elles, fonctionnent grâce à la force de portance. Il en existe trois sortes principales, illustrées sur la figure 1.4: le rotor en troposkine, le rotor en H et le rotor hélicoïdal.

La forme la plus simple est celle du rotor en H. La forme de troposkine, ou forme de la corde à sauter, correspond à la forme que prend un câble sous l'effet des forces centripètes lorsque ses extrémités sont fixées à un axe tournant à vitesse angulaire constante. De cette manière les contraintes de flexion sont minimisées. Cette forme permet également une diminution des efforts dus à l'inertie de la structure. La dernière configuration est celle des pales hélicoïdales. Celles-ci parcourent un cer-

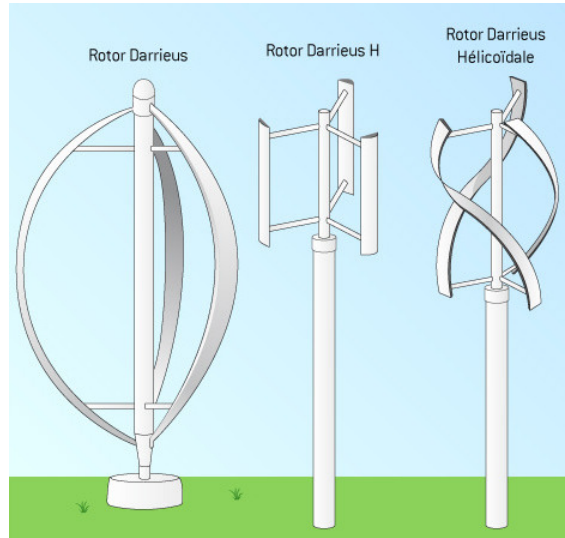


Figure 1.4: Éoliennes de type Darrieus

tain angle sur la circonférence permettant ainsi de distribuer le couple de manière plus uniforme au cours d'une rotation et d'augmenter la durée de vie du dispositif.

Lorsqu'un profil se trouve dans un écoulement, la vitesse du fluide sur l'extrados est plus rapide que sur l'intrados. Cela engendre une dépression et celle-ci est à l'origine de la force de portance. Cette force est d'autant plus importante que l'angle d'attaque est élevé, bien que ce raisonnement ait une limite qui sera introduite dans la section 1.4 (phénomène de décrochage). La force de portance est la force perpendiculaire à l'écoulement comme le montre la figure 1.5 et son expression est la suivante:

$$L = \frac{1}{2}\rho(V_\infty - v)^2 C_L S \quad (1.2)$$

avec C_L le coefficient de portance.

Les dispositifs fonctionnant sur base de la portance ont l'avantage de fonctionner à des vitesses supérieures à la vitesse du vent, et donc à des vitesses de rotation plus importantes que les éoliennes Savonius, pour un rotor de même diamètre, et en utilisant moins de matériaux. Néanmoins, elles ont des difficultés au démarrage à cause d'un manque de couple. En effet, pour de faibles vitesses de rotation les pales sont en décrochage, ce qui signifie que la force de traînée est prépondérante à la force de portance et l'éolienne est par conséquent freinée.

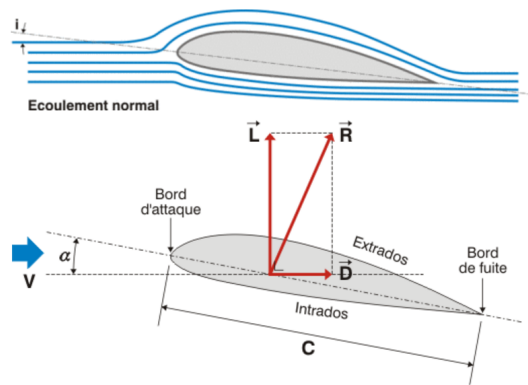


Figure 1.5: Force de portance

Hybrides

Il existe des éoliennes hybrides, c'est-à-dire qu'elles sont composées d'une partie Darrieus accouplée avec une partie Savonius, comme illustré sur la figure 1.6. La partie Savonius permet de démarrer l'éolienne tandis que la partie Darrieus augmente les performances. Cependant, pour que les deux parties tournent à leur vitesse de rotation optimale, il faut qu'elles soient indépendantes l'une de l'autre et cela rend le dispositif beaucoup plus complexe à réaliser.



Figure 1.6: Éolienne hybride

1.2 Quelques généralités

1.2.1 Puissance

La puissance générée par une éolienne dépend en premier lieu du vent présent et plus particulièrement de la puissance qu'il génère. Celle-ci s'obtient en multipliant le débit par l'énergie cinétique. La formule exacte est reprise ci-dessous, avec A la surface balayée par le rotor, qui se calcule $A = 2RH$ dans le cas d'une éolienne de type Darrieus.

$$P = \rho A V_\infty \frac{V_\infty^2}{2} = \rho R H V_\infty^3 \quad (1.3)$$

La puissance mécanique qui peut être produite par une éolienne représente une fraction de la puissance du vent. Cette fraction est donnée par le coefficient de puissance, noté C_p , qui caractérise les performances aérodynamiques des éoliennes. En 1919, une théorie a été développée par Albert Betz [9] déterminant la quantité maximale d'énergie pouvant être extraite à partir d'une éolienne. Ce maximum correspond à 59.3% de la puissance du vent et est connu sous le nom de limite de Betz. Cette limite est représentée sur la figure 1.1 rencontrée précédemment.

La puissance mécanique générée par une éolienne est définie comme:

$$P = C_p \rho R H V_\infty^3 \quad (1.4)$$

1.2.2 Paramètres caractérisant les VAWT

Sont repris ci-dessous différents paramètres permettant de caractériser les éoliennes Darrieus.

Vitesse spécifique

La vitesse spécifique, ou tip speed ratio en anglais et notée TSR par la suite, est un paramètre adimensionnel mettant en relation la vitesse en bout de pale et la vitesse de l'écoulement amont. Il dépend du rayon du rotor ainsi que de la vitesse angulaire ω . Son expression est définie par:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (1.5)$$

À chaque éolienne correspond un TSR spécifique maximisant le C_p , il est donc fréquemment employé pour définir les caractéristiques d'une éolienne.

Le TSR est également utilisé pour relier les coefficients de couple, noté C_q , et de puissance. La relation entre les deux s'écrit:

$$C_p = C_q \lambda \quad (1.6)$$

Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est très important pour la modélisation de VAWT. Les coefficients de portance et de traînée dépendent en effet de ce nombre. Celui-ci est lié au TSR, au rayon du rotor et à la vitesse relative. Étant donné que cette dernière varie tout au long d'une rotation (voir section 1.3.4.1), il est nécessaire de recalculer le nombre de Reynolds à chaque position afin de capturer exactement les coefficients de portance et de traînée correspondants. Son expression est donnée par:

$$Re = \frac{\lambda W}{R} \quad (1.7)$$

où W correspond à la vitesse relative.

Sweep

La figure 1.7 représente le rotor réalisé dans le cadre de ce mémoire comprenant trois pales en troposkine avec un caractère hélicoïdal supplémentaire (le choix de design sera expliqué ultérieurement dans la section 1.6).

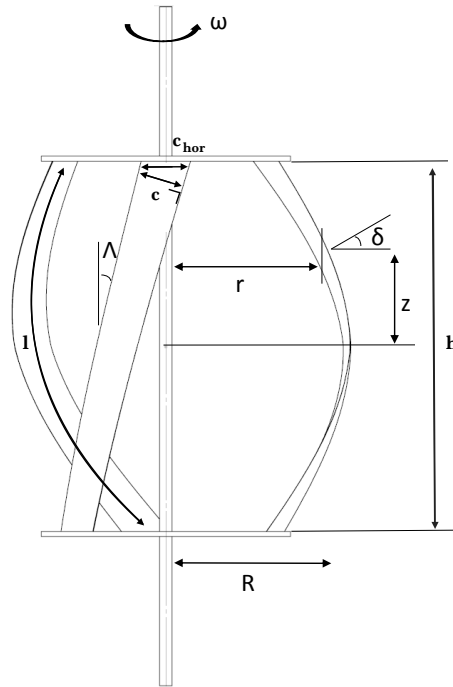


Figure 1.7: VAWT à trois pales en troposkine avec caractère hélicoïdal

Dans le cas d'un rotor hélicoïdal, les pales sont caractérisées par l'angle de sweep Λ . Celui-ci est défini comme l'angle formé entre la verticale et la ligne portante de la pale, il se calcule comme suit:

$$\tan \Lambda = \frac{R \xi}{h} \quad (1.8)$$

où ξ correspond à l'arc de cercle intercepté par la pale.

Troposkine

La troposkine, ou courbe de la corde à sauter, correspond à la forme prise par un fil flexible homogène inextensible en rotation autour d'un axe auquel il est accroché en deux points, en négligeant la pesanteur. Cette courbe est caractérisée par l'équation différentielle suivante [15] et illustrée sur la figure 1.8:

$$a^2 \sqrt{1 + x'^2} = b^2 - x^2 \quad (1.9)$$

où a , b et f sont les paramètres de la courbe: a représente la hauteur, f la flèche maximale et b est lié aux deux autres par : $f^2 = b^2 - a^2$. Cette courbe peut être approximée par une parabole (voir figure 1.8) dont l'équation est la suivante:

$$\frac{r}{R} = 1 - \left(\frac{z}{h/2} \right)^2 \quad (1.10)$$

où r est le rayon local et z est la hauteur au-dessus du plan équatorial, comme illustré sur la figure 1.7.

En dérivant cette expression, il est possible de déterminer la pente locale entre la normale à cette courbe et l'horizontale:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{2 R z}{(h/2)^2} \right) \quad (1.11)$$

Longueur de pale

Pour un rotor en troposkine, hélicoïdal ou une combinaison des deux, la longueur d'une pale est supérieure à h (figure 1.7). Afin de calculer la longueur totale d'une pale une discrétisation de celle-ci selon la direction z a été nécessaire. La longueur de chaque petit élément Δl a ensuite été calculé comme suit:

$$\Delta l = \frac{\Delta h}{\cos \delta \cos \Lambda} \quad (1.12)$$

La longueur totale d'une pale s'obtient ensuite en additionnant chaque élément Δl .

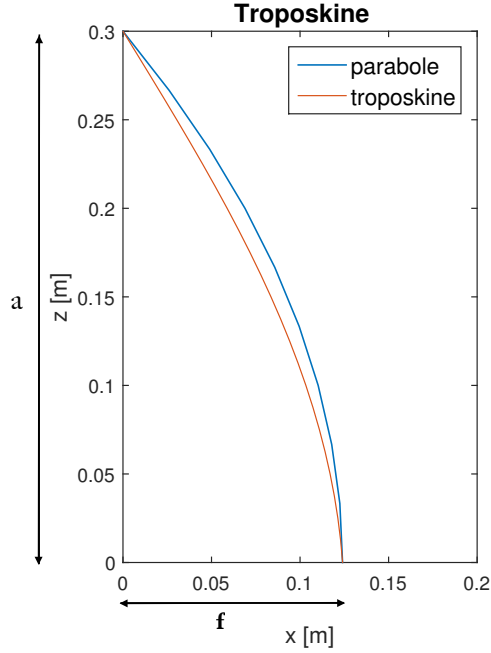


Figure 1.8: Troposkine avec $a = 0.3$ $b = 0.325$ et parabole

Solidité

La solidité du rotor σ exprime la proportion de surface balayée par le rotor qui est occupée par les pales. Il en existe plusieurs définitions mais celle utilisée tout au long de ce travail est la suivante:

$$\sigma = \frac{Nc}{2R} \quad (1.13)$$

où N correspond au nombre de pales du rotor.

La corde d'un profil se trouve toujours dans le plan orthogonal à la ligne portante (figure 1.7), qui n'est pas horizontal dans le cas d'une pale hélicoïdale. Pour le calcul de la solidité c'est donc la projection de la corde dans le plan horizontal qui est utilisée, la relation (1.13) devient donc:

$$\sigma = \frac{Nc_{hor}}{2R} = \frac{N}{2R} \frac{c}{\cos\Lambda} \quad (1.14)$$

Aspect ratio

Une éolienne peut être caractérisée par deux aspect ratio différents, notés AR : l'aspect ratio du rotor et l'aspect ratio d'une pale. Le premier correspond au rapport entre la longueur d'une pale et le diamètre du rotor, le second est le rapport entre la longueur d'une pale et la corde. Les relations sont définies comme:

$$AR_{rotor} = \frac{l}{2R} \quad (1.15)$$

$$AR_{blade} = \frac{l}{c} \quad (1.16)$$

1.3 Méthode "Double Multiple Streamtube"

Il existe plusieurs méthodes permettant d'analyser l'aérodynamique des éoliennes à axe vertical, chacune ayant ses avantages et inconvénients. Il est donc généralement nécessaire de trouver un compromis entre validité des résultats et complexité du problème, temps de calcul, en fonction des objectifs visés.

La méthode choisie pour ce travail est la *Double Multiple Streamtube* (DMST). Celle-ci, utilisée dans de nombreux ouvrages [31] [33], est relativement simple à implémenter et fournit des résultats acceptables. Cette section fait largement référence au travail de fin d'étude de Q. Taverne intitulé "Modélisation par forces surfaciques d'éoliennes à axe vertical" [35].

Le principe de cette méthode consiste à évaluer la variation de quantité de mouvement du fluide et la force appliquée par la pale sur l'écoulement. Ce concept est connu sous le nom de *Blade Element Momentum theory* (BEM). Il est utilisé pour déterminer les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales, ce qui permet ensuite de calculer le couple et la puissance générée.

1.3.1 Surface actuatrice

Avant de décrire la méthode DMST il convient de préciser le concept de surface actuatrice. Le rotor d'une éolienne est représenté par une surface actuatrice, celle-ci peut être définie comme une région géométrique en deux dimensions au travers de laquelle s'écoule un fluide et créant une discontinuité de pression au sein de l'écoulement. Une telle surface absorbe une partie de l'énergie du vent et engendre un ralentissement de l'écoulement. Ceci est illustré sur la figure 1.9.

Cette théorie nécessite la mise en place de plusieurs hypothèses: surface d'épaisseur infinitésimale, fluide parfait et incompressible, écoulement unidimensionnel, stationnaire et irrotationnel.

La conservation de la masse appliquée au volume de contrôle du système fournit la relation suivante:

$$V_{\infty}A_{\infty} = VA = V_wA_w \quad (1.17)$$

L'hypothèse de fluide incompressible permet d'avoir une vitesse égale de part et d'autre de la surface actuatrice $V_+ = V_- = V$. L'énergie extraite par la surface engendre une discontinuité de pression $p_- = p_+ - \Delta p$.

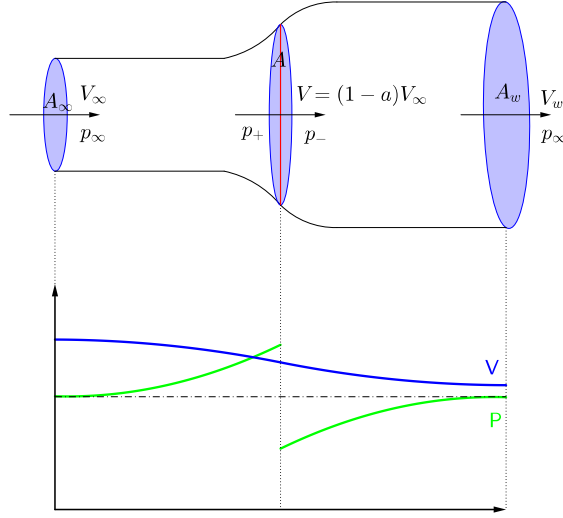


Figure 1.9: Tube de courant passant à travers une surface actuatrice [35]

En appliquant les équations de Bernoulli en amont et aval de la surface actuatrice il est possible de déterminer ces vitesses et pressions:

$$p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 = p_{+} + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (1.18)$$

$$p_{-} + \frac{1}{2}\rho V^2 = p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho V_w^2 \quad (1.19)$$

où la pression infini aval est égale à la pression infini amont.

La chute de pression s'obtient en soustrayant les équations (1.18) et (1.19).

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho(V_{\infty}^2 - V_w^2) \quad (1.20)$$

Ayant un écoulement stationnaire, la différence de pression rencontrée à la surface actuatrice est égale à la force appliquée par cette surface sur le fluide ainsi qu'à la variation de quantité de mouvement de celui-ci. Dès lors, la poussée appliquée par la surface actuatrice peut se calculer de deux manières:

$$T = \dot{m}(V_{\infty} - V_w) = \rho A V (V_{\infty} - V_w) \quad (1.21)$$

$$T = A \Delta p = \frac{1}{2}\rho A (V_{\infty}^2 - V_w^2) \quad (1.22)$$

En égalant (1.21) et (1.22) on obtient:

$$V = \frac{V_{\infty} + V_w}{2} \quad (1.23)$$

La vitesse du vent dans le plan du rotor correspond alors à la moyenne entre les vitesses infini amont et aval. En définissant un facteur d'induction a comme étant la fraction de la réduction de la vitesse du vent entre l'écoulement libre et le plan du rotor, alors:

$$a = \frac{V_\infty - V}{V_\infty} \quad (1.24)$$

$$V = (1 - a)V_\infty \quad (1.25)$$

$$V_w = (1 - 2a)V_\infty \quad (1.26)$$

En remplaçant ces équations dans (1.22), la force appliquée par la surface actuatrice sur le fluide devient:

$$T = \frac{1}{2}\rho AV_\infty^2 [4a(1 - a)] \quad (1.27)$$

La puissance se déduit facilement en calculant le travail de cette force par unité de temps:

$$P = T V = \frac{1}{2}\rho AV_\infty^3 [4a(1 - a)^2] \quad (1.28)$$

Le coefficient de puissance peut alors être défini avec le facteur d'induction:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^3} \quad (1.29)$$

$$= 4a(1 - a)^2 \quad (1.30)$$

L'optimisation de ce paramètre permet de trouver la valeur de a maximisant le coefficient de puissance: $a_{opt} = \frac{1}{3}$. En remplaçant cette valeur dans l'équation (1.30) on obtient la valeur maximale du coefficient de puissance:

$$C_{p_{opt}} = \frac{16}{27} = 59,26\% \quad (1.31)$$

Cette valeur est la quantité maximale d'énergie cinétique de l'écoulement que peut extraire une surface actuatrice et correspond à la limite de Betz.

1.3.2 Principe de la "Double Multiple Streamtube Method"

Dans le cas des éoliennes à axe vertical, le vent passe deux fois à travers le rotor et les vitesses induites diffèrent entre les parties amont et aval. Les éoliennes Darrieus peuvent donc être représentées par deux surfaces actuatrices en tandem à chaque section du rotor. La première surface représente la surface balayée par la pale pour la moitié amont et la deuxième correspond à la seconde moitié balayée par les pales,

en aval. Cette théorie a été développée par B.G. Newman [29].

L'équation (1.31) a montré qu'une surface actuatrice peut extraire au maximum 59,26% de l'énergie cinétique du vent. En plaçant une seconde surface actuatrice en tandem, celle-ci pourrait extraire une puissance supplémentaire et ainsi augmenter la valeur du coefficient de puissance. B.G. Newman a développé cette théorie pour n actuator surfaces en série et a montré que le coefficient de puissance approche 64% pour une paire de surfaces actuatrices et tend vers 66,66% à partir de six.

La méthode DMST modélise une éolienne Darrieus par une série de surfaces actuatrices en tandem, interceptant chacun un tube de courant, comme illustré sur la figure 1.10. Le principe de la BEM est ensuite appliqué sur chaque surface.

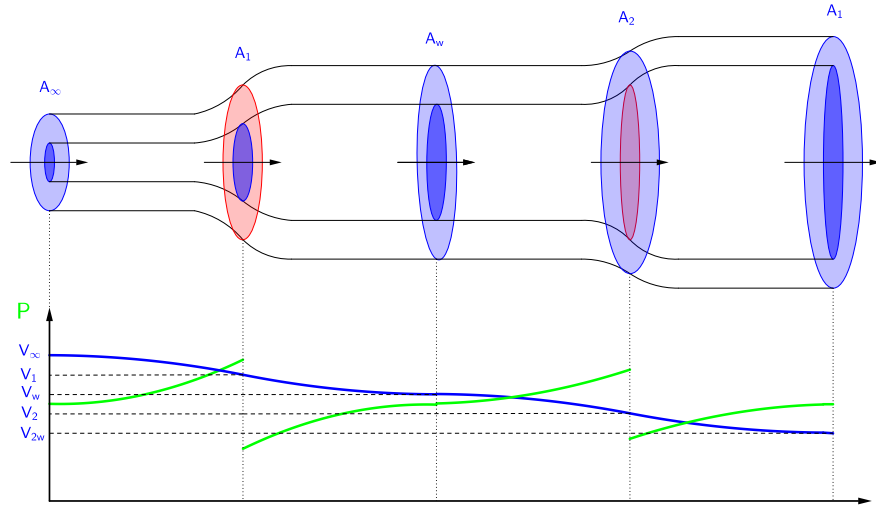


Figure 1.10: Double tube de courant avec surfaces actuatrices en tandem [35]

1.3.3 Expansion des tubes de courant

Étant donné que la vitesse moyenne du fluide est diminuée lors de son passage au travers du rotor, il est nécessaire que la section des tubes de courant augmente afin de conserver un débit constant au sein de ceux-ci. Le modèle d'expansion des tubes de courant a été développé par Sharpe [21] et Soraghan [33] et repris dans le travail de Taverne [35].

Le rotor est discrétisé en divisant les pales en plusieurs segments selon la hauteur et en séparant le vent incident en plusieurs tubes de courant pour chaque segment.

N_s est le nombre de segments sur chaque pale, N_d le nombre de tubes de courant et N_t le nombre de positions azimutales, directement lié à N_d par:

$$N_d = \frac{N_t}{2} + 1 \quad (1.32)$$

Une représentation schématique de l'expansion des tubes est reprise sur la figure 1.11. La convention utilisée tout au long de ce travail concernant la position azimutale est la suivante: la position aval la plus loin est associée à $\theta = 0^\circ$ et le rotor tourne dans le sens anti-horlogique.

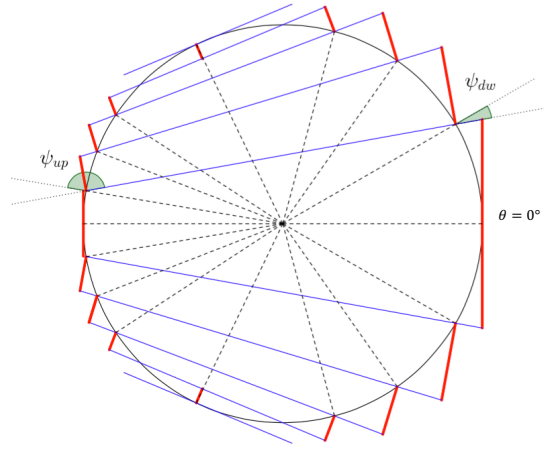


Figure 1.11: Méthode DMST avec expansion des tubes de courant [35]

Le modèle d'expansion des tubes de courant nécessite de poser plusieurs hypothèses. Tout d'abord, l'expansion du tube de courant selon z est négligeable. De plus, les tubes de courant sont considérés comme étant droits. En effet, généralement l'expansion amène à certaines difficultés concernant les frontières entre chaque tube étant donné que la position azimutale de ces frontières dépend du degré d'expansion et donc des facteurs d'induction. Cette difficulté peut se résoudre en considérant des tubes de courant droits et en calculant les facteurs d'induction dans un certain ordre. Le tube central est suivi de paires consécutives de tubes de courant sur toute la région comprise à l'intérieur du chemin de rotation. Le facteur d'induction du tube central est donc calculé en premier lieu, permettant de déterminer son degré d'expansion. Les positions des tubes adjacents sont alors connues et les facteurs d'induction correspondants peuvent être calculés avant de considérer les tubes suivants. Ce procédé continue tant que tous les facteurs ne sont pas connus.

Suite à l'expansion, la direction de la vitesse du vent incident V_∞ se déforme vers l'extérieur. La position azimutale θ est définie par rapport à la direction originale

de V_∞ mais pour le calcul du facteur d'induction il convient d'introduire un nouvel angle. Soit ψ l'angle entre la direction radiale à la frontière du tube et la direction du tube de courant, comme illustré figure 1.11. Il convient de poser $\psi = 0^\circ$ pour le tube de courant central.

La procédure pour calculer les facteurs d'induction est détaillée dans la section 1.3.4. Une fois les facteurs d'induction amont et aval a_{up} et a_{dw} connus, les vitesses U_{up} et U_{dw} se calculent via les formules (1.25) et (1.26).

Pour un tube de courant étendu, il existe exactement une section du tube qui conserve l'aire du tube de courant sans expansion, il s'agit de la section d'équilibre, nommée A_e . La vitesse d'équilibre correspondante est U_e . A_e étant la moyenne des sections amont et aval, elle se calcule:

$$A_e = \frac{A_{up} + A_{dw}}{2} \quad (1.33)$$

Puisque A_e est indépendant du degré d'expansion du tube, il est possible de lui donner une expression dépendant uniquement de la longueur de l'arc intercepté $\delta\psi$ et de la position azimutale:

$$A_e = R |\cos\psi| \delta\psi \Delta h \quad (1.34)$$

avec $\delta\psi = \frac{2\pi}{N_d}$.

La conservation de la masse donne:

$$A_e U_e = A_{up} U_{up} = A_{dw} U_{dw} \quad (1.35)$$

En combinant (1.33) et (1.35) et en simplifiant:

$$U_e = \frac{2U_{up}U_{dw}}{U_{up} + U_{dw}} \quad (1.36)$$

Il est possible de réécrire l'équation (1.35) grâce à (1.36) et en introduisant deux facteurs d'expansion amont et aval, χ_{up} et χ_{dw} respectivement:

$$A_e \frac{2U_{up}U_{dw}}{U_{up} + U_{dw}} = A_{up}\chi_{up} U_{up} = A_{dw}\chi_{dw} U_{dw} \quad (1.37)$$

χ_{up} et χ_{dw} sont donc donnés par:

$$\chi_{up} = \frac{2U_{dw}}{U_{up} + U_{dw}} \quad (1.38)$$

$$\chi_{dw} = \frac{2U_{up}}{U_{up} + U_{dw}} \quad (1.39)$$

Ces facteurs sont utilisés pour déterminer les positions des tubes de courant suivants sur le périmètre du cercle de rotation, selon les équations suivantes:

$$\text{Quadrants 1 \& 2} \begin{cases} \theta_R = \theta_P - \chi_{up} \delta\psi \\ \theta_S = \theta_Q + \chi_{dw} \delta\psi \end{cases} \quad (1.40)$$

$$\text{Quadrants 3 \& 4} \begin{cases} \theta_R = \theta_P + \chi_{up} \delta\psi \\ \theta_S = \theta_Q - \chi_{dw} \delta\psi \end{cases} \quad (1.41)$$

Ceci est illustré sur la figure 1.12.

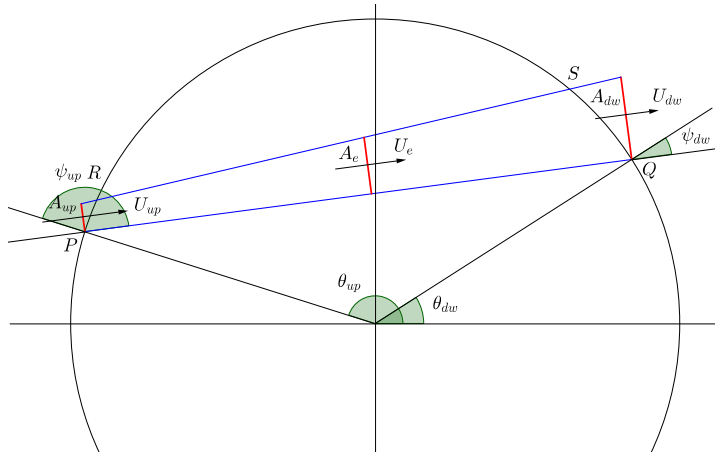


Figure 1.12: Paramètres pour l'expansion des tubes de courant [35]

1.3.4 Calcul du facteur d'induction

Le facteur d'induction, comme expliqué précédemment, se détermine en égalant la variation de quantité de mouvement de fluide à la force exercée sur la pale par l'écoulement. La première étape de ce calcul consiste à déterminer l'angle d'attaque et la vitesse relative.

La figure 1.13 représente les angles et vecteurs du problème. Tous les angles, à l'exception de θ sont définis positifs dans le sens horlogique.

1.3.4.1 Vitesse relative

La vitesse relative W est la résultante provenant de l'addition de deux vecteurs: le vent incident dans la direction du tube de courant local (U), et le vent dû à la

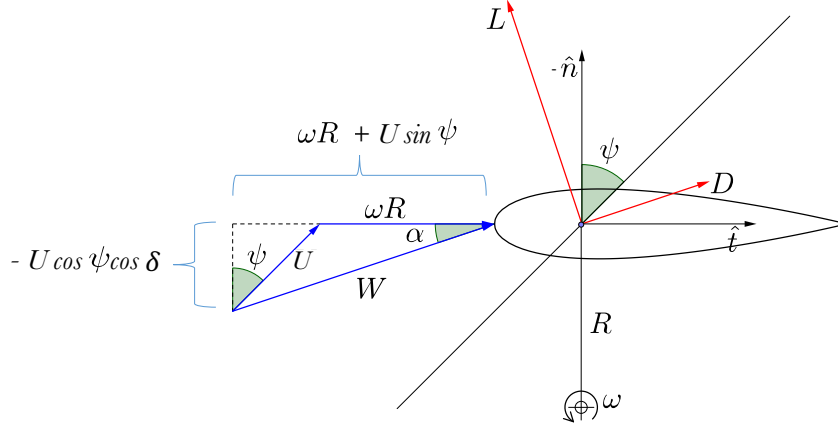


Figure 1.13: Paramètres caractéristiques de l'écoulement autour du profil [35]

rotation de la pale (ωR) qui est tangente à la trajectoire (figure 1.13).

Afin de calculer W , ses composantes parallèles et perpendiculaires à la tangente de la direction de rotation sont requises, comme illustré sur la figure 1.13. La composante perpendiculaire à la tangente de la trajectoire doit rester dans le plan du profil. Dès lors, pour un élément de pale ayant un angle de troposkine, cette composante est affectée d'un facteur $\cos \delta$.

Les composantes normales et tangentielles à la trajectoire sont donc:

$$W_n = -U \cos \psi \cos \delta \quad (1.42)$$

$$W_t = \omega R + U \sin \psi \quad (1.43)$$

où $U = (1 - a)V_\infty$ lorsque la pale se trouve dans la partie amont de la VAWT et $U = (1 - a)(1 - 2a)V_\infty$ dans la partie aval.

Dans le cas d'une pale hélicoïdale, seule la composante de la vitesse relative normale au bord d'attaque est à considérer, ceci est illustré sur la figure 1.14.

La vitesse relative se calcule donc finalement:

$$W_\perp = \cos \Lambda \sqrt{(\omega R + U \sin \psi)^2 + (-U \cos \psi \cos \delta)^2} \quad (1.44)$$

La figure 1.15 illustre la variation de vitesse relative au cours d'une rotation

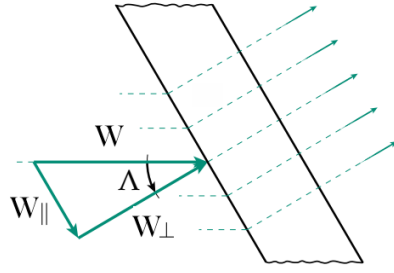


Figure 1.14: Pale hélicoïdale: la seule composante de la vitesse relative à considérer est celle qui est orthogonale à la ligne portante [19]

et pour différents types de rotor: H, hélicoïdal, troposkine et troposkine hélicoïdal. Ces courbes ont été calculées pour une vitesse spécifique de 1.5 et une solidité de 0.2.

Étant donné que la vitesse relative s'obtient en additionnant deux composantes de vitesses, celle-ci est maximale lorsque les deux composantes sont alignées et de même signe et minimale lorsque les signes sont opposés. Cela se produit aux alentours de 90° et 270° respectivement.

Il convient de remarquer que l'angle de troposkine n'a que très peu d'influence sur la vitesse relative, tandis que l'angle de sweep diminue la norme de celle-ci.

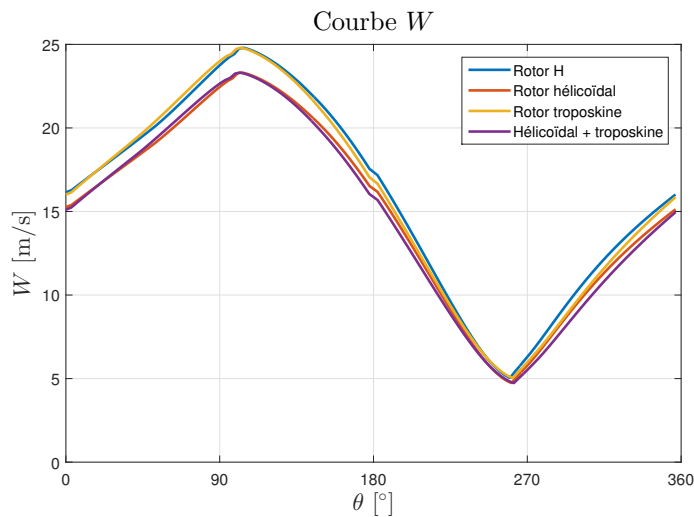


Figure 1.15: Variation de la vitesse relative sur une rotation en fonction du type de rotor

1.3.4.2 Angle d'attaque

L'angle d'attaque α est l'angle formé entre la corde du profil et le vecteur vitesse relative W dans le plan du profil. Il peut s'exprimer en fonction des composantes de la vitesse relative:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{-U \cos \psi \cos \delta}{U \sin \psi + \omega R} \right) \quad (1.45)$$

De même que pour la vitesse relative, la figure 1.16 illustre les variations d'angle d'attaque sur une rotation complète et pour les quatre types de rotor.

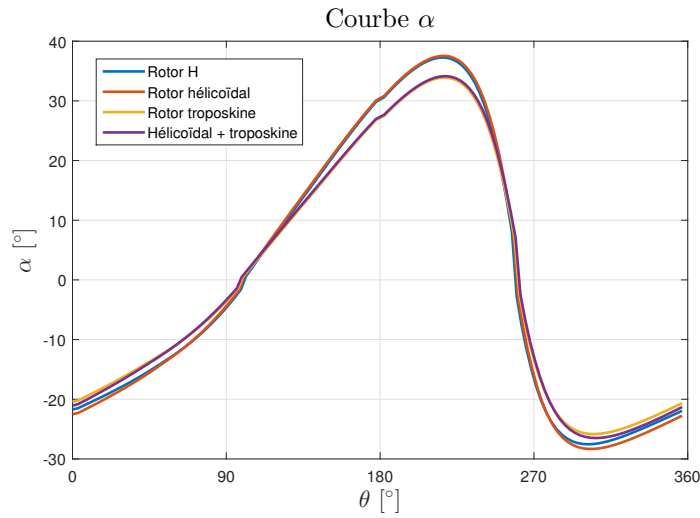


Figure 1.16: Variation de l'angle d'attaque sur une rotation en fonction du type de rotor

Ces courbes montrent des angles d'attaque quasiment nuls aux alentours de 90° et 270° . En effet à ces positions azimutales la vitesse infini amont et la vitesse de rotation de la pale sont alignées. L'expansion des tubes de courant modifie cependant la direction locale de la vitesse infini amont, ce qui explique que ces cas particuliers ne se produisent pas exactement à 90° et 270° . Plus la vitesse spécifique est importante, plus la direction locale est modifiée et donc plus les positions azimutales s'éloigneront de 90° et 270° .

En revanche, à 180° les deux composantes sont perpendiculaires ce qui implique un angle d'attaque élevé. Dans la partie aval de l'éolienne la vitesse infini amont est ralentie, les valeurs absolues des angles d'attaque dans la partie aval sont alors inférieures à celles dans la partie amont.

Le rotor hélicoïdal ne modifie quasiment pas l'angle d'attaque tandis que la troposkine amène à des angles d'attaques plus faibles.

1.3.4.3 Forces appliquées à la pale

Les forces aérodynamiques exercées par l'écoulement sur une pale sont illustrées sur la figure 1.17 et leurs expressions sont données par les formules (1.46).

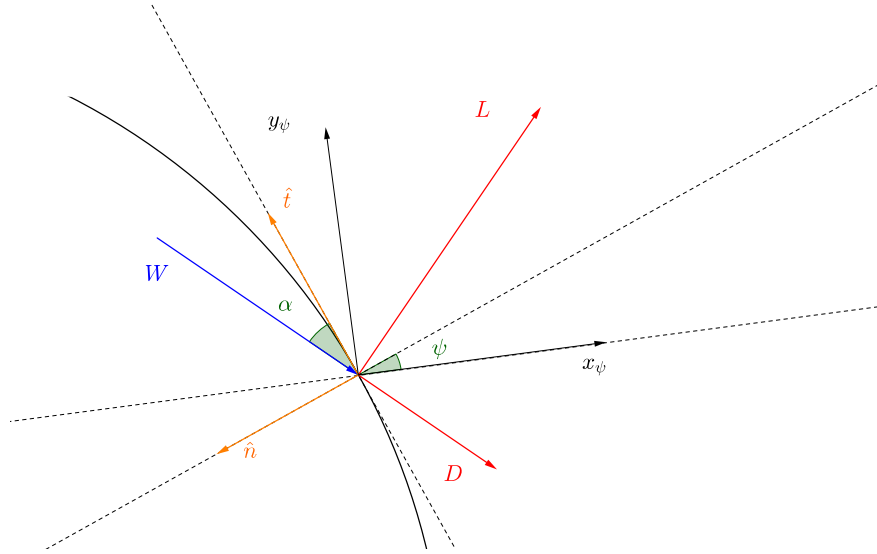


Figure 1.17: Forces appliquées au profil [35]

$$\begin{cases} L = \frac{1}{2} \rho c \Delta l C_L W^2 & [N] \\ D = \frac{1}{2} \rho c \Delta l C_D W^2 & [N] \end{cases} \quad (1.46)$$

Les composantes normales et tangentielles se déduisent par trigonométrie:

$$\begin{cases} F_n = L \cos \alpha + D \sin \alpha = \frac{1}{2} \rho c \Delta l C_n W^2 & [N] \\ F_t = L \sin \alpha - D \cos \alpha = \frac{1}{2} \rho c \Delta l C_t W^2 & [N] \end{cases} \quad (1.47)$$

Les logiciels *Xfoil* [17] ou *Q-blade* [13] permettent de calculer les coefficients de portance et de traînée C_L et C_D en fonction du nombre de Reynolds et de l'angle d'attaque. Les composantes normales et tangentielles de ces coefficients dans le plan

du profil s'obtiennent selon les relations suivantes:

$$\begin{cases} C_{n \text{ airfoil}} = C_L \cos\alpha + C_D \sin\alpha \\ C_{t \text{ airfoil}} = C_L \sin\alpha - C_D \cos\alpha \end{cases} \quad (1.48)$$

Ces composantes se trouvent dans le plan du profil défini par les vecteurs $\hat{t}$ et $\hat{n}$ et doivent être reprojctées dans le plan équatorial. La figure 1.18 illustre le repère associé au profil aérodynamique. Nous avons décidé de placer le repère à deux endroits du rotor afin de mieux se représenter en 3D les effets du sweep et de la troposkine. Le vecteur $\hat{l}$ est tangent à la ligne portante, le vecteur $\hat{t}$ est tangent au vecteur corde et $\hat{n}$ est le vecteur orthogonal aux deux autres et dirigé vers l'extérieur du rotor.

Les projections de $C_{n \text{ airfoil}}$ et $C_{t \text{ airfoil}}$ dans le plan équatorial donnent:

$$\begin{cases} C_n = (C_L \cos\alpha + C_D \sin\alpha) \cos\delta \\ C_t = (C_L \sin\alpha - C_D \cos\alpha) \cos\Lambda \end{cases} \quad (1.49)$$

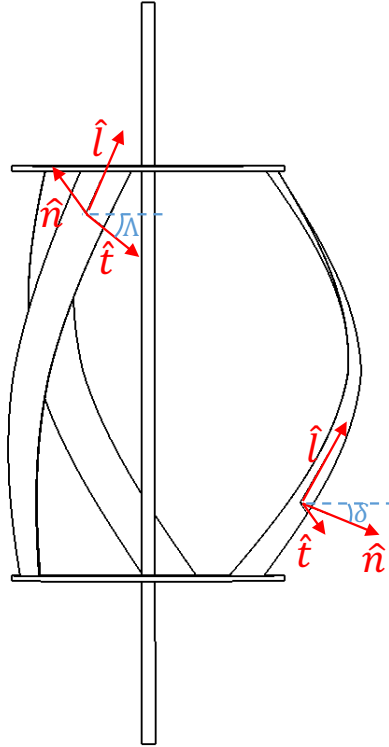


Figure 1.18: Illustration du repère dans le plan du profil

Afin de déterminer le facteur d'induction, c'est la poussée dans la direction du tube de courant qu'il faut évaluer à la variation de quantité de mouvement à travers la surface actuatrice. Cette direction est notée x_ψ sur la figure 1.17.

Cette force se calcule donc:

$$F_x^{blade} = F_n \cos\psi + F_t \sin\psi \quad (1.50)$$

$$= \frac{1}{2} \rho c \Delta l W^2 (C_n \cos\psi + C_t \sin\psi) \quad (1.51)$$

En posant $A = c \Delta h$, l'adimensionnalisation de cette expression donne:

$$C_x^{blade} = \frac{F_n \cos\psi + F_t \sin\psi}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^2} \quad (1.52)$$

$$= (C_n \cos\psi + C_t \sin\psi) \frac{\Delta l}{\Delta h} \left(\frac{W}{V_\infty} \right)^2 \quad (1.53)$$

1.3.4.4 Coefficient de poussée d'une surface actuatrice

Il est possible de calculer l'effet moyen du rotor sur l'écoulement dans la région de la surface actuatrice en fonction du facteur d'induction a . La poussée exercée par la surface actuatrice est donnée par l'équation (1.27). Le coefficient de poussée s'obtient par l'expression suivante:

$$C_T = \frac{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^2 [4a(1-a)]}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^2} = 4a(1-a) \quad (1.54)$$

Pour de grandes valeurs de a , la théorie de la surface actuatrice n'est plus valable. De nombreux ouvrages ([33], [26]) utilisent une correction empirique qui fut apportée par Glauert en 1926 lorsque a dépasse une valeur limite $a_{th} = 1 - \frac{\sqrt{1.7}}{2}$:

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a) & si \quad a < a_{th} \\ 4[a_{th}^2 + (1-2a_{th})a] & si \quad a > a_{th} \end{cases} \quad (1.55)$$

1.3.4.5 Équation transcendante pour le facteur d'induction

Pour déterminer le facteur d'induction, il faut maintenant évaluer les expressions de la poussée de la surface actuatrice sur l'écoulement et de la poussée due aux pales.

D'après (1.27) la première est donnée par:

$$F_x^{mom} = \frac{1}{2} \rho A V_\infty^2 C_T \quad (1.56)$$

où $A = R|\cos\psi|\delta\psi\Delta h$ est l'aire de la surface actuatrice et C_T est donné par l'équation (1.55).

La seconde est donnée par (1.51) en inversant le signe pour prendre en compte la réaction de la pale sur le fluide:

$$F_x^{blade} = \frac{1}{2} \rho c \Delta l W^2 (-C_n \cos\psi - C_t \sin\psi) \quad (1.57)$$

Il convient à présent prendre en compte le nombre de pales ainsi que la fraction du temps qu'une pale passe à l'intérieur d'un tube de courant. Soit N le nombre de pales et $\frac{\delta\psi}{2\pi}$ la fraction de temps qu'une pale passe à l'intérieur d'un tube de courant interceptant un angle $\delta\theta$. $\delta\theta$ n'étant pas encore connu lors du calcul du facteur d'induction, celui-ci sera approximé par $\delta\psi$.

La force exercée par une pale devient donc:

$$F_x^{blade} = \frac{1}{2} \rho c \Delta l W^2 (-C_n \cos\psi - C_t \sin\psi) \left(\frac{N\delta\psi}{2\pi} \right) \quad (1.58)$$

La facteur d'induction se calcule en égalant les expressions (1.56) et (1.58):

$$\frac{1}{2} \rho c \Delta l W^2 (-C_n \cos\psi - C_t \sin\psi) \left(\frac{N\delta\psi}{2\pi} \right) = \begin{cases} 2\rho R|\cos\psi|\delta\psi\Delta h a(1-a)V_\infty^2 & \text{si } a < a_{th} \\ 2\rho R|\cos\psi|\delta\psi\Delta h [a_{th}^2 + (1-2a_{th})a]V_\infty^2 & \text{si } a > a_{th} \end{cases} \quad (1.59)$$

que l'on peut simplifier, en se rappelant que $\Delta l = \frac{\Delta h}{\cos\Lambda \cos\delta}$:

$$\frac{\sigma(-C_n \cos\psi - C_t \sin\psi)}{\pi |\cos\psi| \cos\Lambda \cos\delta} (-C_n \cos\psi - C_t \sin\psi) \left(\frac{W}{V_\infty} \right)^2 = \begin{cases} 4a(1-a) & \text{si } a < a_{th} \\ 4[a_{th}^2 + (1-2a_{th})a] & \text{si } a > a_{th} \end{cases} \quad (1.60)$$

en se rappelant que les coefficient C_n et C_t sont définis par les équations (1.49).

Il faut à présent déterminer, pour chaque surface actuatrice, la valeur de a qui permet d'égaliser ces deux équations. Afin de résoudre numériquement cette équation, la méthode de la bissection a été choisie. Celle-ci possède l'avantage d'être assez simple et ainsi d'avoir un temps de calcul relativement court. Bien que cette méthode ne converge que linéairement es résultats restent tout à fait acceptable.

1.3.5 Calcul du couple et de la puissance

Une fois que le facteur d'induction est calculé, il est possible de déterminer l'angle d'attaque et la vitesse relative sur toute la trajectoire pour ensuite de calculer le couple et la puissance créés par l'éolienne.

Le couple produit par un élément de pale de longueur Δl et ayant une position azimutale θ est donné par l'expression suivante:

$$Q_b(\theta) = \frac{1}{2} \rho c \Delta l W(\theta)^2 C_t(\theta) R \quad [Nm] \quad (1.61)$$

Le couple total moyen créé par les N pales s'obtient en intégrant cette relation sur toute la trajectoire:

$$Q = \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho c \Delta l W(\theta)^2 C_t(\theta) R d\theta \quad [Nm] \quad (1.62)$$

Maintenant que le couple est connu, il est possible d'en déduire la puissance. En effet, ceux-ci sont liés par la vitesse angulaire de la même manière que le TSR relie les coefficients de couple et de puissance (éq. 1.6):

$$P = \omega Q \quad [W] \quad (1.63)$$

Sous forme adimensionnelle, le coefficient de puissance d'un élément de pale se calcule:

$$C_p = \frac{\omega Q}{1/2 \rho \Delta A V_\infty^3} \quad (1.64)$$

avec $\Delta A = 2R \Delta h$.

$$C_p = \frac{\omega N}{2\pi} \frac{\int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \rho c \Delta l W(\theta)^2 C_t(\theta) R d\theta}{1/2 \rho (2R) \Delta h V_\infty^3} \quad (1.65)$$

En se rappelant l'équation (1.12): $\Delta l = \frac{\Delta h}{\cos \Lambda \cos \delta}$:

$$C_p = \frac{\sigma \lambda}{2\pi \cos \Lambda \cos \delta} \int_0^{2\pi} C_t \frac{W^2}{V_\infty^2} d\theta \quad (1.66)$$

1.4 Décrochage aérodynamique

1.4.1 Phénomène de décrochage

Comme indiqué précédemment, le coefficient de portance augmente avec l'incidence mais cette croissance a une limite. Ce phénomène est connu sous le nom de décrochage aérodynamique.

Comme le montre la courbe ci-dessous (voir figure 1.19), à partir d'un certain angle d'attaque le coefficient de portance chute brusquement et cela engendre une baisse des performances aérodynamiques du profil. L'angle à partir duquel se produit le décrochage, appelé angle de décrochage statique, dépend du profil, du fluide et du nombre de Reynolds. Étant donné que l'angle d'attaque vu par la pale est d'autant plus élevé que le TSR est bas, le décrochage devient de plus en plus important pour de faibles TSR.

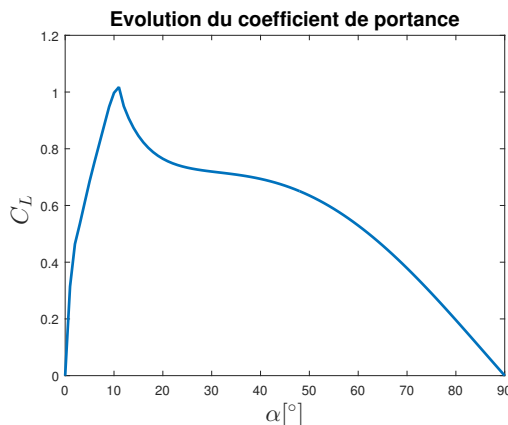


Figure 1.19: Coefficient de portance pour un profil NACA0015 et un nombre de Reynolds de 75000.

La figure 1.20 représente bien le phénomène de décrochage. Celui-ci résulte du décollement de la couche limite sur l'extrados. Plus l'angle d'attaque est important, plus l'écoulement s'accélère sur l'extrados et plus la dépression qui en résulte est importante. Cela engendre d'une part une augmentation de la portance et d'autre part une séparation de la couche limite. Cette séparation se rapproche du bord d'attaque au fur et à mesure que l'angle d'attaque augmente. Au-delà de l'angle de décrochage statique, la séparation est si intense qu'il y a une chute de la portance et une augmentation rapide de la traînée.

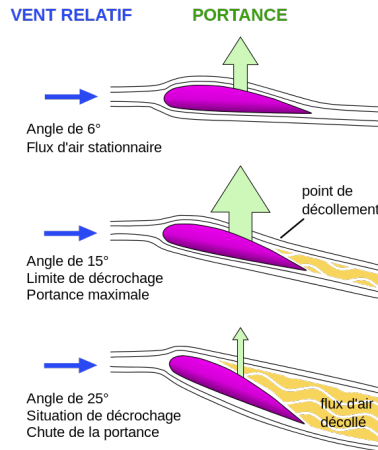


Figure 1.20: Phénomène de décrochage

1.4.2 Décrochage dynamique

Le décrochage dynamique est un phénomène non-linéaire qui se produit lorsque le profil change rapidement d'angle d'attaque. Le taux de variation de l'angle d'attaque lorsque le profil dépasse l'angle de décrochage statique a une influence sur la manière dont la couche limite se sépare ou se rattache. Il est donc primordial de tenir compte de cet effet afin de pouvoir estimer plus précisément les performances des VAWT, surtout dans le cas de faibles TSR.

Lorsque l'angle de décrochage statique est rapidement dépassé, il arrive que le décrochage soit retardé jusqu'à des angles d'attaque bien plus élevés, le profil passe alors en régime de décrochage dynamique. Cependant, lorsque le profil décroche vraiment, la chute de portance et l'augmentation de traînée sont plus brutales et de plus grandes amplitudes que dans le cas statique. Le comportement des efforts aérodynamiques est fortement non-linéaire et se caractérise par une boucle d'hystérésis comme illustré sur les figures 1.21 (a) et (b).

Les différentes étapes du décrochage dynamique sont reprises ci-dessous. Les chiffres correspondent à ceux de la figure 1.22 tandis que les lettres correspondent aux graphes des figures 1.21 (a) et (b).

1. Avant que l'angle de décrochage statique ne soit dépassé, la couche limite reste accrochée au profil et le coefficient de portance augmente quasi linéairement. Ce comportement est similaire à celui du cas statique.
2. **A:** À partir de l'angle de décrochage statique, une vitesse de retour apparaît

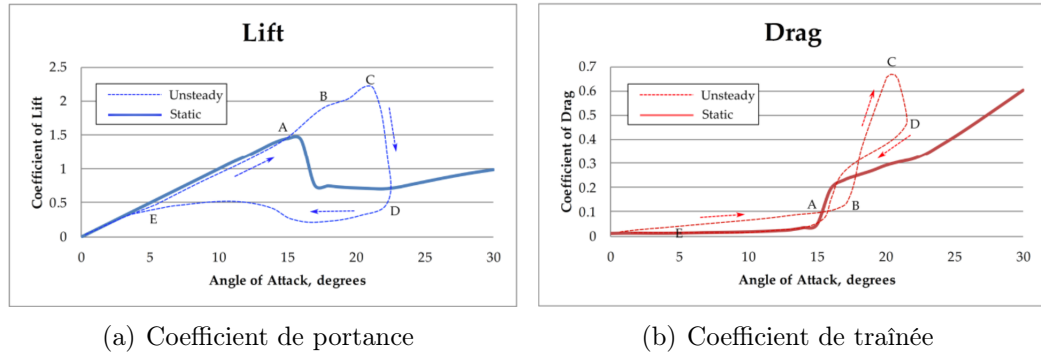


Figure 1.21: Illustrations du phénomène de décrochage dynamique [33]

dans la couche limite. Un revirement de vitesse émerge au bord de fuite sur l'extrados et avance vers le bord d'attaque. Dans le cas non stationnaire, le point de décollement et le point de revirement de la vitesse sont dissociés et ceci amène à l'absence de modifications du comportement aérodynamique. Dans le cas statique, au contraire, les deux points sont confondus et c'est ce qui engendre le décrochage.

3. **B vers C**: Pour des angles supérieurs à l'angle de décrochage statique, un tourbillon émerge sur l'extrados au bord d'attaque. Ceci est dû au décollement de la couche limite qui s'enroule et qui est constamment alimentée. Une forte dépression est présente au centre du vortex et cela crée un effet de succion perceptible sur la surface du profil par un pic de dépression localisé. Cela provoque un léger gain de portance par rapport au comportement linéaire et une hausse considérable de la traînée.
4. **C vers D**: Lorsque le tourbillon rejoint approximativement la moitié de la corde, le coefficient de portance atteint sa valeur maximale, il chute ensuite rapidement jusqu'à des valeurs inférieures à celles du cas statique. Le coefficient de traînée diminue également mais reste supérieur au cas statique.
5. **E**: Lorsque l'angle d'attaque devient suffisamment faible, la couche limite se rattache de l'amont du profil jusqu'à l'aval. La traînée correspond approximativement à celle du cas statique mais la portance reste significativement inférieure à la portance statique tant que le ré-attachement n'est pas complet.

1.4.2.1 Modélisation du décrochage dynamique

Il existe différents modèles pour simuler les effets du décrochage dynamique et parmi eux celui de Gormont, utilisé dans ce travail. Ce modèle a été conçu pour les rotors

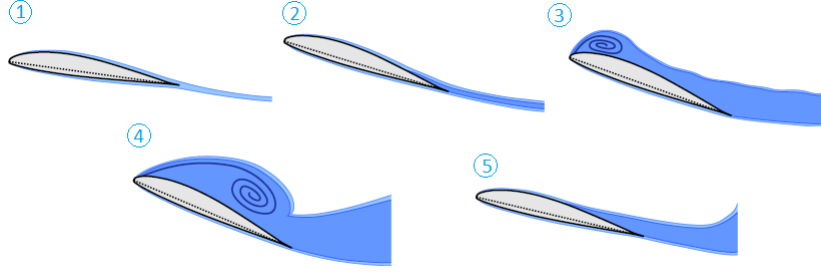


Figure 1.22: Comportement d'un profil sous l'effet du décrochage dynamique [18]

d'hélicoptères par Boeing-Vertol Company. Il s'agit du modèle le plus ancien et le plus souvent utilisé pour les éoliennes Darrieus, on le retrouve dans de nombreuses études [18], [31], [33].

Étant donné que ce modèle a été développé pour un rotor d'hélicoptère, Strickland l'a adapté afin qu'il convienne mieux aux éoliennes Darrieus. Les hypothèses posées par Strickland sont les suivantes: profil épais, écoulement incompressible et pas de dépendance au nombre de Mach.

Les équations suivantes correspondent au modèle de Gormont adapté par Strickland et s'appliquent lorsque l'angle d'attaque local est supérieur à l'angle de décrochage statique, noté α_{ss} et défini comme l'angle pour lequel le coefficient de portance est maximal.

L'angle d'attaque modifié, noté α_{dyn} , est l'angle d'attaque utilisé pour le calcul des coefficients aérodynamiques et prend une valeur différente lors des calculs de traînée et de portance. Son expression est la suivante:

$$\alpha_{dyn} = \alpha - \gamma K_1 \sqrt{\left| \frac{c\dot{\alpha}}{2W} \right|} S_{\dot{\alpha}} \quad (1.67)$$

où W , α et c sont les valeurs locales respectives de la vitesse relative, de l'angle d'attaque et de la corde, γ et K_1 sont des constantes empiriques, $\dot{\alpha}$ est la variation temporelle d'angle d'attaque et $S_{\dot{\alpha}}$ représente le signe de cette variation.

Soit t/c l'épaisseur relative du profil, les constantes γ se calculent respectivement pour la portance et la traînée comme suit:

$$\gamma_L = 1.4 - 6 (0.06 - t/c) \quad (1.68)$$

$$\gamma_D = 1 - 2.5 (0.06 - t/c) \quad (1.69)$$

La constante K_1 dépend du signe de $\dot{\alpha}$:

$$K_1 = 0.75 + 0.25S_{\dot{\alpha}} \quad (1.70)$$

Une fois l'angle d'attaque et ces constantes calculés, les coefficients de portance et de traînée sont déterminés grâce aux relations suivantes:

$$C_L = C_L[\alpha_{dyn}] \left(\frac{\alpha}{\alpha_{dyn} - \alpha_0} \right) \quad (1.71)$$

$$C_D = C_D[\alpha_{dyn}] \quad (1.72)$$

α_0 correspond à l'angle d'attaque pour lequel la portance est nulle, soit 0° dans le cas d'un profil symétrique.

L'influence de la modélisation du décrochage dynamique est illustrée sur la figure 1.24. En l'absence de décrochage dynamique, il y a une petite zone en amont, entre 170 et 220° , où le facteur d'induction chute à cause du décrochage.

1.4.3 Extension de la polaire

Les logiciels tels que *Xfoil* et *Q-blade* [13] permettent de générer les polaires associées à un profil aérodynamique pour un nombre de Reynolds déterminé mais leur méthode ne converge plus pour des angles d'attaque trop élevés (généralement vers $20 - 25^\circ$). Il est donc nécessaire d'implémenter un modèle permettant d'étendre la polaire jusqu'à 90° afin de pouvoir prédire le comportement aérodynamique du profil lors d'incidences importantes.

Viterna [34] fournit une approche permettant d'étendre les polaires à partir du décrochage. Cette méthode utilise l'angle de décrochage statique, les coefficients aérodynamiques associés ainsi que l'aspect ratio de la pale. Les équations de Viterna sont présentées ci-après:

$$C_{D \max} = 1.11 + 0.018 AR \quad (\alpha = 90^\circ) \quad (1.73)$$

$$C_D = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha \quad (\alpha = \alpha_{ss} \longrightarrow 90^\circ) \quad (1.74)$$

$$C_L = A_1 \sin 2\alpha + A_2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \quad (\alpha = \alpha_{ss} \longrightarrow 90^\circ) \quad (1.75)$$

avec:

- $B_1 = C_{D \max}$

- $B_2 = \frac{C_{D\ stall} - C_{D\ max} \sin^2 \alpha_{stall}}{\cos \alpha_{stall}}$
- $A_1 = B_1/2$
- $A_2 = (C_{L\ stall} - C_{D\ max} \sin \alpha_{stall} \cos \alpha_{stall}) \frac{\sin \alpha_{stall}}{\cos^2 \alpha_{stall}}$

L'extension des coefficients aérodynamiques après le décrochage est illustrée sur la figure 1.23.

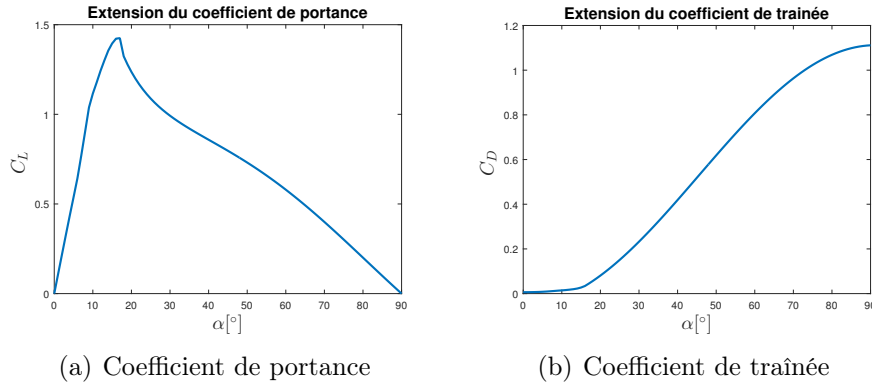


Figure 1.23: Extension de la polaire pour un profil NACA0015 et un nombre de Reynolds de 10^6

La figure 1.24 montre l'influence de l'extension de la polaire sur le facteur d'induction.

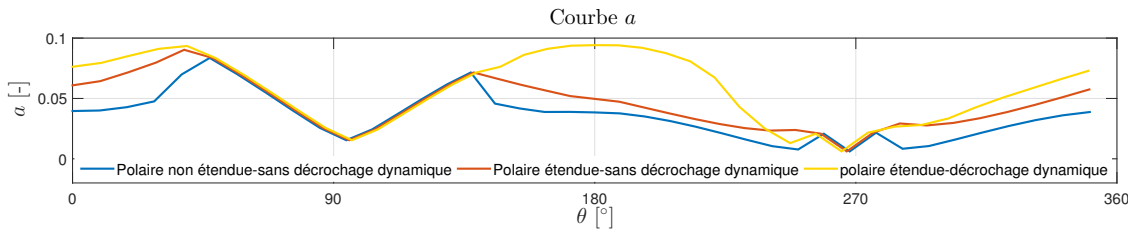


Figure 1.24: Influence de l'extension de la polaire et du décrochage dynamique sur le facteur d'induction

Le nombre de Reynolds a un impact significatif sur les performances aérodynamiques du profil. Or la vitesse relative et donc le nombre de Reynolds, varient sur toute une rotation de pale. Il est donc important que la méthode numérique de modélisation utilise le bon Reynolds pour chaque position azimutale de pale.

1.5 Analyse paramétrique

1.5.1 Influence de la solidité

La figure 1.25 présente l'influence de la solidité sur les performances aérodynamiques.

Dans le cas d'un rotor à solidité élevée, la vitesse spécifique optimale est faible et les performances se dégradent rapidement lorsque la vitesse spécifique augmente. La courbe $C_p - \lambda$ est de plus en plus pointue lorsque la solidité s'accroît ce qui signifie que les performances aérodynamiques sont très sensibles au point de fonctionnement, qui doit dès lors être choisi avec précision.

Pour une faible solidité, la vitesse spécifique est élevée et la courbe $C_p - \lambda$ est bien plus lisse, les performances sont donc moins sensibles au point de fonctionnement.

Par ailleurs, plus la solidité est élevée, moins le rotor est efficace.

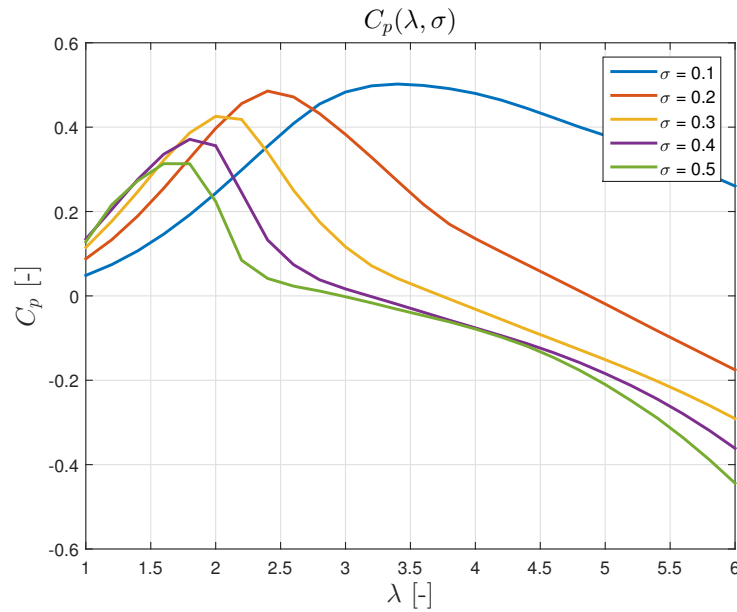


Figure 1.25: Influence de la solidité sur le coefficient de puissance

La figure 1.26 représente les variations d'angle d'attaque en fonction de la vitesse spécifique, sur une rotation complète de l'éolienne et pour une solidité de 0.4.

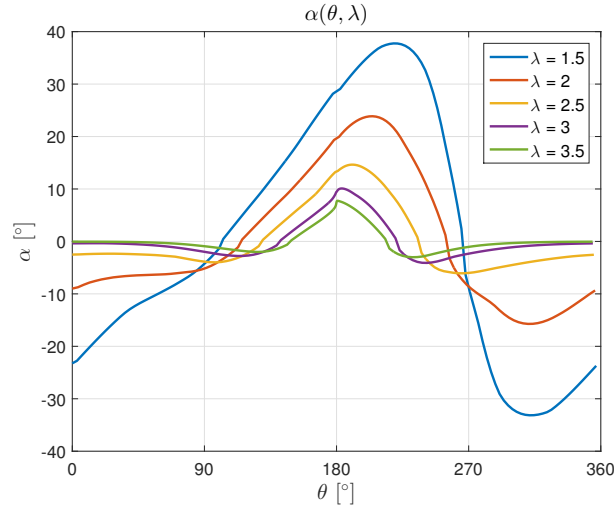


Figure 1.26: Angle d'attaque pour différentes vitesses spécifiques, $\sigma = 0.4$

Il convient de remarquer que pour des vitesses spécifiques faibles les valeurs extrêmes d'angle d'attaque sont beaucoup plus élevées. En effet, pour de faibles TSR la vitesse infini amont et la vitesse de rotation de la pale sont du même ordre de grandeur. En revanche, pour des TSR plus élevés c'est la vitesse de rotation de la pale qui prend le dessus.

Concernant l'écrasement de la courbe dans la partie aval, il est beaucoup plus marqué pour des vitesses spécifiques élevées car l'éolienne est plus chargée et donc ralentit l'écoulement.

En conclusion:

- Pour une solidité faible, les performances sont peu sensibles au point de fonctionnement et la vitesse spécifique optimale est élevée. Pour une telle vitesse spécifique les variations d'angle d'attaque sont faibles.
- Pour une solidité élevée il est nécessaire de calculer le point de fonctionnement avec précision. La vitesse spécifique optimale est faible et correspond à des angles d'attaque élevés. Notons que dans ce cas-ci il est important de faire attention au phénomène de décrochage.

1.5.2 Influence du type de rotor

Il est évident que la forme des pales du rotor influence les performances de l'éolienne. Ceci est illustré sur la figure 1.27.

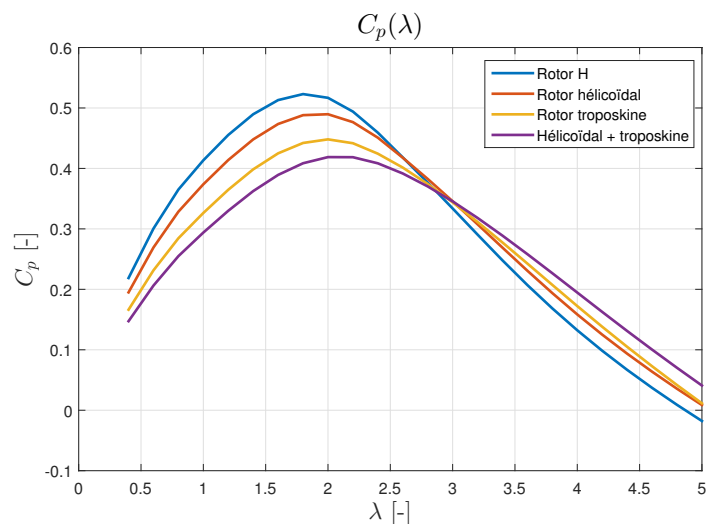


Figure 1.27: Influence du type de rotor sur le coefficient de puissance

Le rotor en H est celui présentant les meilleures performances et la vitesse spécifique optimale la plus faible. Le caractère hélicoïdal des pales diminue un peu les performances mais c'est l'angle de troposkine qui détériore le plus le rendement. Ensemble, les deux effets semblent s'additionner en diminuant encore plus les performances et en augmentant la vitesse spécifique optimale.

1.6 Design des pales

1.6.1 Choix du profil

La sélection du profil aérodynamique est très critique dans le design des pales. En effet, celui-ci définit les coefficients de portance et de traînée et donc les performances aérodynamiques de l'éolienne. Il existe une infinité de profils aérodynamiques et les plus courants sont les profils NACA¹. Ces profils sont définis sur base d'un code à quatre chiffres selon la forme NACA MPXX avec:

- M: Cambrure maximale en pourcentage de la corde
- P: Point de cambrure maximal par rapport au bord d'attaque en pourcentage de la corde
- XX: Épaisseur maximale du profil en pourcentage de la corde

Il existe également des profils NACA à cinq chiffres qui correspondent à des surfaces portantes plus complexes.

Les profils symétriques (MP = 00) sont les plus couramment utilisés, bien que ceux-ci produisent un couple plus faible au démarrage.

Une étude a été réalisée à l'université de Windsor au Canada analysant les performances de plusieurs profils aérodynamiques pour un rotor Darrieus [23]. Parmi tous les profils testés, le NACA0015 (figure 1.28) a montré les meilleures performances. Certains profils asymétriques tels que le NASA LS-0417 ou le NACA4415 produisent plus de couple au démarrage mais le NACA0015 est globalement plus performant. De plus, de nombreux auteurs choisissent ce même profil lorsqu'il s'agit d'étudier les VAWT [33], [35] et [31] et le considèrent comme le profil idéal pour ce type d'éolienne. C'est donc ce même profil qui a été utilisé dans ce travail.

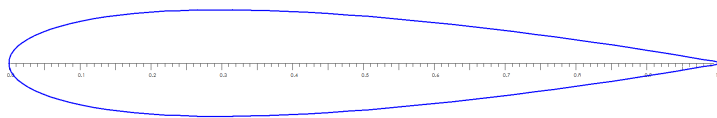


Figure 1.28: Profil aérodynamique NACA0015

¹NACA = National Advisory Committee on Aeronautics

1.6.2 Choix du rotor

Dans le cadre de ce travail, nous avons décidé de travailler sur une éolienne de type Darrieus, en combinant le rotor en troposkine et le rotor hélicoïdal afin de bénéficier des avantages de chacun. Ce design est illustré sur la figure 1.29. La forme de troposkine permet de limiter les efforts de flexion dans les pales. En outre, leur donner un caractère hélicoïdal supplémentaire répartit le couple de manière plus uniforme sur une rotation. Lisser le couple permet de limiter les vibrations et ainsi augmenter la durée de vie du dispositif.

En plus d'être moins performante, une éolienne de type Savonius a directement été exclue pour cause de sa géométrie et des dimensions limitées de l'imprimante 3D. Celles-ci seront détaillées dans le chapitre 3.

Comme vu précédemment (équation (1.3)), la puissance d'une éolienne est proportionnelle au carré de la vitesse du vent, à l'aire balayée par le rotor et au coefficient de puissance. L'objectif est donc de maximiser ces deux derniers.

Afin d'optimiser la surface balayée, nous avons décidé d'écarter les pales de l'axe central. Les extrémités de pales débutent donc à un rayon minimal non nul qui s'accroît en suivant la troposkine pour atteindre sa valeur maximale en milieu de pale. Il faut cependant tenir compte de plusieurs limitations avant de déterminer les dimensions exactes.

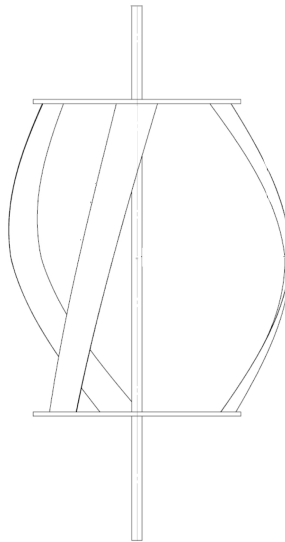


Figure 1.29: Design de l'éolienne

1.6.2.1 Limitations

Les principales limitations proviennent des procédés de fabrication utilisés tels que l'impression 3D et la découpe laser. Ces techniques seront détaillées dans le chapitre 3 sur le prototypage rapide.

Hauteur maximale

Les dimensions du volume d'impression de la *Up mini* sont de 12cm dans toutes les directions, ce qui implique que les pales seront assemblées en plusieurs morceaux selon la hauteur. Chaque jonction constituera une zone plus fragile, il est donc préférable de limiter le nombre de fragments, que nous fixons à six. Chacun des morceaux ayant une certaine inclinaison et une certaine épaisseur, il faut le positionner au mieux sur le plateau d'impression afin qu'il rentre dans le volume d'impression. Pour cette raison, la hauteur maximale imposée pour chaque morceau est de 10cm et non 12 . La hauteur totale des pales est ainsi limitée à 60cm .

Corde

Bien qu'il soit possible d'assembler plusieurs morceaux selon la hauteur pour construire une pale, le profil aérodynamique quant à lui doit tout de même pouvoir s'inscrire dans la surface de $12 \times 12\text{ cm}^2$ du plateau d'impression. En considérant à nouveau l'inclinaison de la pale, la corde maximale permise est d'environ 10cm , en fonction de l'inclinaison. En revanche, la corde ne doit pas non plus descendre en dessous d'une certaine valeur que nous fixons à 5cm sinon la pale deviendrait trop fragile.

Rayon maximal au centre

Afin que le dispositif complet puisse être testé en soufflerie, il est essentiel que les dimensions de l'éolienne soient inférieures au diamètre de la soufflerie, soit 1m . Afin que les pales soient suffisamment écartées du bord de la soufflerie, nous avons décidé de fixer le rayon maximal à 0.35m .

Rayon maximal aux extrémités

Les pales seront accrochées au mât central grâce à deux plateaux circulaires placés aux extrémités. Ceux-ci seront découpés au moyen de la découpeuse laser et ne peuvent donc pas dépasser les dimensions du volume de travail de la machine, soit $60 \times 40\text{cm}$. En comptant l'épaisseur du profil, le rayon maximal aux extrémités doit rester inférieur à 20cm . Le rayon moyen maximal est obtenu en calculant la moyenne des rayons maximaux au centre et aux extrémités et est égal à 0.27cm .

Angle de sweep

Plus l'inclinaison des pales est importante, plus celles-ci parcourent un arc de cercle important, et donc plus le couple est réparti uniformément au cours d'une rotation. Cependant, des études expérimentales [18] montrent que les performances d'un rotor hélicoïdal sont fortement détériorées à partir d'une inclinaison de 30° . Étant donné que l'inclinaison dépend du rayon du rotor (voir équation (1.8)), celle-ci sera variable sur toute la hauteur de la pale. Nous fixons dès lors l'angle moyen à 20° afin que l'inclinaison ne dépasse jamais 25° .

Angle de troposkine

Le diamètre maximal au centre des pales, quant à lui, dépend de la courbe troposkine. En effet, celle-ci peut être plus ou moins inclinée et ainsi avoir un rayon maximal plus ou moins grand. Il est nécessaire de limiter cette inclinaison afin que chaque morceau de 10 cm de haut puisse rentrer dans le volume de l'imprimante (sinon il faudrait plus de six morceaux pour une seule pale). Cependant, plus l'inclinaison est importante, plus l'aire balayée le sera aussi, il s'agit donc de faire un compromis. Nous avons fixé l'inclinaison maximale à 40° .

Vitesse de rotation

Un autre facteur limitant est la vitesse de rotation du rotor. En effet, la force centripète est proportionnelle au carré de cette vitesse, qu'il faut donc limiter au maximum. Au plus l'éolienne est petite, au plus la vitesse de rotation optimale sera importante. En effet, pour une même vitesse spécifique et une vitesse de vent constante, la vitesse de rotation d'une turbine de petit diamètre est plus élevée que pour cette même turbine mise à l'échelle avec un diamètre plus important ($\omega = \frac{V_\infty \lambda}{R}$). Il faut donc essayer de maximiser le diamètre afin de rester à une vitesse de rotation inférieure à la vitesse maximale que nous fixons de manière arbitraire à 800 *RPM*, afin de limiter les effets centripètes.

Récapitulatif

Pour résumer, les contraintes dimensionnelles sont reprises dans la table 1.1, avec n le nombre maximal de morceaux par pale.

n	H_{max}	c_{max}	c_{min}	R_{max}	R_{min}	Λ_{moyen}	δ_{max}	ω_{max}
6	60 cm	10 cm	5 cm	< 35 cm	< 20 cm	20°	40°	800 RPM

Table 1.1: Contraintes de design

1.6.2.2 Pré-dimensionnement

Afin d'établir un premier dimensionnement, nous avons évalué les performances de plusieurs géométries différentes. Les estimations de coefficient de puissance et vitesse spécifique optimaux ont été réalisés pour le cas d'un rotor en H et pour une vitesse de vent de 10 m/s . La table 1.2 présente les résultats obtenus. Nous avons étudié différents cas pour des rotors de trois ou cinq pales avec des solidités allant de 0.2 à 0.5 et des corde de 5, 7 et 9 cm . Les valeurs trop élevées de vitesse rotation et rayon sont indiquées en rouge.

3 pales						
$\sigma[-]$	$c[m]$	$R[m]$	$\lambda_{opt}[-]$	$\omega_{opt}[RPM]$	$C_{p\,opt}[-]$	$P_{max}[W]$
0.2	0.05	0.375	2.4	611	0.48	130
	0.07	0.525		436		181
	0.09	0.675		339		233
0.3	0.05	0.25	2.2	840	0.41	74
	0.07	0.35		600		103
	0.09	0.45		566		132
0.4	0.05	0.18	1.8	954	0.37	48
	0.07	0.25		687		67
	0.09	0.34		505		90
0.5	0.05	0.15	1.6	1018	0.31	33
	0.07	0.21		727		46
	0.09	0.27		565		60
5 pales						
$\sigma[-]$	$c[m]$	$R[m]$	$\lambda_{opt}[-]$	$\omega_{opt}[RPM]$	$C_{p\,opt}[-]$	$P_{max}[W]$
0.4	0.04	0.25	1.8	687	0.37	66
	0.05	0.31		554		82
	0.09	0.56		306		149
0.5	0.05	0.25	1.6	611	0.31	56
0.7	0.07	0.25	1.5	572	0.22	39

Table 1.2: Pré-dimensionnement du rotor

Pour un rotor à cinq pales, nous remarquons que pour rester dans les limites fixées de rayon moyen maximal et de corde minimale, la solidité devient très importante ce qui diminue fortement le coefficient de puissance. Parmi les rotors à trois pales dont toutes les dimensions satisfont les contraintes, nous avons opté pour celui dont le coefficient de puissance est le plus élevé, soit celui correspondant à une solidité de 0.4.

Les dimensions retenues pour un premier dimensionnement sont donc:

Hauteur: 60 *cm*

Rayon: 25 *cm*

Corde: 7 *cm*

Solidité: 0.4

1.6.2.3 Ligne portante

La figure 1.30 présente plusieurs troposkines en fonction du paramètre b (équation(1.9)). Pour garder un rayon moyen de 0.25 *m*, un rayon maximal au centre de 0.35 *m* et un rayon maximal aux extrémités de 0.2 *m*, la courbe la plus adaptée et celle correspondant à $b = 0.325$. Cette troposkine correspond à un rayon maximal de 0.124 *m* et est caractérisée par une inclinaison aux extrémités de 39.5° .

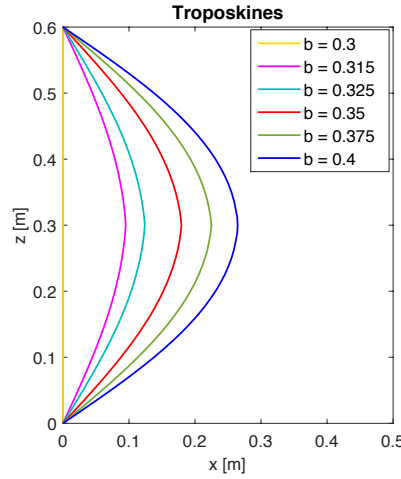


Figure 1.30: Courbes de troposkine en fonction de b

La ligne portante des pales sera donc caractérisée par cette courbe, à laquelle l'on ajoute un angle de sweep moyen de 20° . Cet angle sera donc égal à 16° en bout de pale et à 24° au centre (voir équation (1.8)).

1.6.2.4 Corde

La méthode DMST étant une méthode 2D, elle ne permet pas de tenir compte de la variation de rayon des pales selon la hauteur. Dès lors, il convient de discrétiser le rotor en plusieurs sections et d'appliquer la méthode DMST sur chacun des

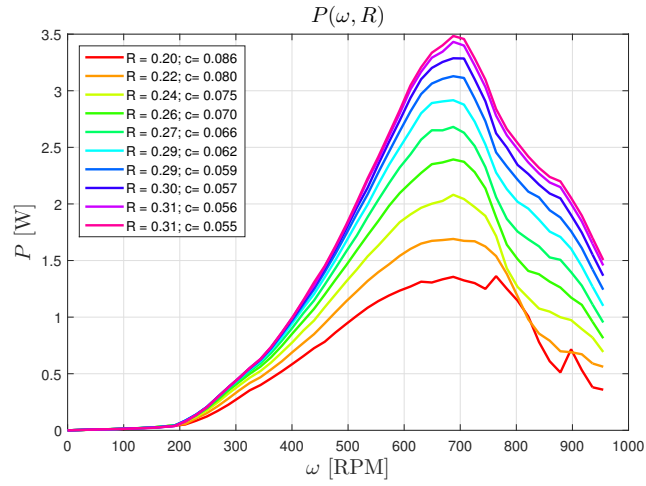
fragments. De cette manière, il est possible d'obtenir les courbes de C_p de chaque morceau individuel. Chacun de ceux-ci est alors défini par un rayon, une corde, une solidité, une longueur et une inclinaison de sweep et de troposkine locaux.

D'après l'équation (1.5), pour une vitesse de rotation donnée, le TSR est plus élevé pour de grands rayons. De plus, la figure 1.25 montre que le TSR optimal est plus élevé pour de faibles solidités.

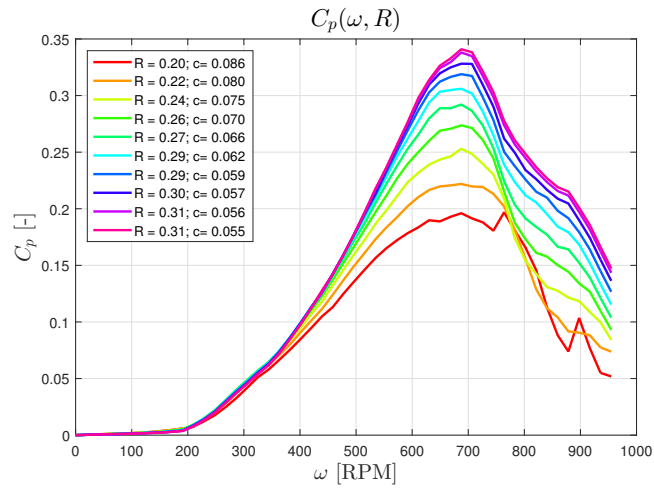
Le rayon de la turbine étant variable, son TSR optimal fluctue également, de même que la solidité optimale. Aux extrémités, le rayon est petit ce qui signifie que le TSR optimal est faible et donc la solidité optimale importante. Au contraire, au centre de la pale le rayon est plus important et donc le TSR est élevé et la solidité faible. Afin que la solidité soit optimale sur toute la longueur de la pale, il convient de faire varier la corde avec le rayon. La corde sera dès lors plus longue aux extrémités de la pale qu'en son centre.

Après quelques essais de calculs de performances en faisant varier la corde aux alentours de 7 cm, les valeurs permettant d'aligner la vitesse de rotation optimale de chaque élément de pale correspondent à une corde de 9 cm aux extrémités et de 5.5 cm au centre de la pale. Les figures 1.31 (a) et (b) présentent les courbes de puissance et de coefficient de puissance généré par chaque morceau de pale.

Chaque fragment possède son point de fonctionnement aux alentours 700 RPM. Bien qu'ils soient tous à leur optimum, ceux des extrémités ont des performances bien moins profitables que les éléments centraux. En effet, comme illustré précédemment sur la figure 1.25, les performances se dégradent lorsque la solidité augmente.



(a) Puissance



(b) Coefficient de puissance

Figure 1.31: Performances de chaque morceau de pale infinitésimal et pour une vitesse de vent de 10 m/s

1.6.3 Résumé

Le tableau 1.3 reprend les caractéristiques finales de l'éolienne où Ex , C et Moy font respectivement référence aux dimensions en bout de pale, au centre et à une valeur moyenne.

Rayon[m]	Corde[m]	Sweep [°]	H[m]	L [m]	σ	Profil
Ex : 0.188	Ex: 0.09	Ex: 16	0.6	0.69	Ex: 0.67	NACA0015
C : 0.312	C: 0.055	C:24			Moy: 0.41 C: 0.29	

Table 1.3: Caractéristiques finales de l'éolienne

La performances globales théoriques de l'éolienne sont reprises sur la figure 1.32. Les courbes sont fort pointues et indiquent le point de fonctionnement de l'éolienne à 687 RPM ce qui correspond à une vitesse spécifique λ égale à 1.8. À cette vitesse de rotation, le coefficient de puissance vaut 0.27 ce qui est très acceptable.

La surface balayée par le rotor est de 0.3249 m^2 . À une vitesse de 10 m/s la puissance du vent passant à travers une telle surface est de 195 [W] (équation (1.3)). Avec un coefficient de puissance de 0.27 la puissance générée par le rotor de l'éolienne vaut 53 [W] , comme illustré sur la figure 1.32 (a).

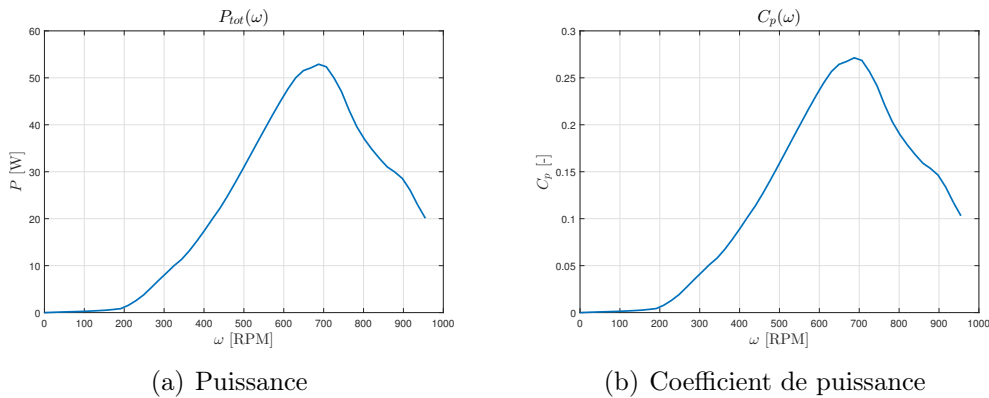


Figure 1.32: Performances globales du rotor

Chapitre 2

Design et dimensionnement

Le chapitre précédent a permis de fixer la géométrie de l'éolienne d'un point de vue aérodynamique. Les dimensions globales des pales et donc du rotor ont également été déterminées.

Il est désormais nécessaire de concevoir l'éolienne dans son ensemble, c'est-à-dire de définir ses différents composants, de déterminer la géométrie la plus adaptée pour chacun et enfin de fixer la manière d'assembler ces composants entre eux.

De plus, afin de s'assurer d'une bonne tenue mécanique des différentes pièces, il convient d'effectuer des calculs de dimensionnement. Ces derniers dépendent principalement des efforts mis en jeu, de la géométrie ainsi que des matériaux utilisés. Rappelons à nouveau l'objectif principal de ce travail qui consiste en la conception d'une éolienne répliquable par tout un chacun. Il est dès lors primordial d'utiliser des composants et matériaux standards et accessibles au grand public.

La structure générale du dispositif peut être visualisée sur la figure 2.1, tandis que l'ensemble des choix de conception sont explicités en détail dans la suite de ce chapitre.

Les composants principaux étudiés sont l'axe de rotation, les pales, les plateaux, les roulements et l'accouplement du générateur.

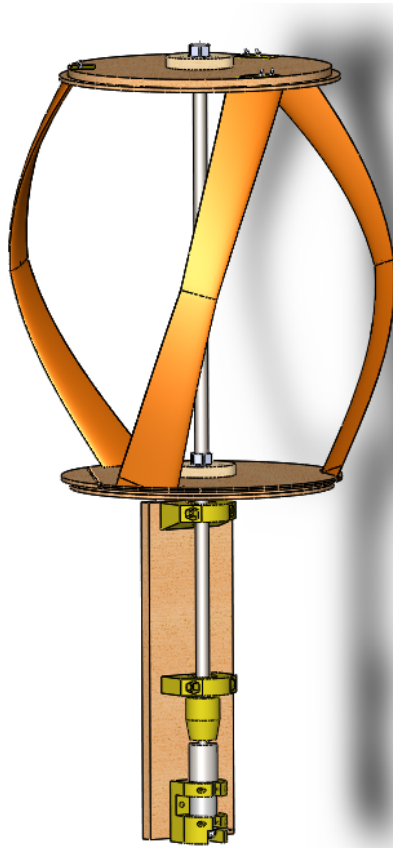


Figure 2.1: Structure de l'éolienne complète

2.1 Axe de rotation

L'axe vertical a pour fonction de transmettre le couple produit par les pales (transmis via le plateau) à la génératrice. Il est donc essentiel que cet arbre soit lié en rotation aux plateaux et à la génératrice.

Un blocage axial par rapport aux roulements et aux plateaux est également nécessaire.

Dans le but d'éviter le recours à des procédés d'usinage qui sont plus complexes et coûteux, tels que le tournage, un axe de diamètre constant sera utilisé et sur lequel des pièces seront fixées afin de réaliser les épaulements et liaisons en rotation. Une solution envisageable est l'utilisation d'une tige filetée sur laquelle seront placés des écrous et contre-écrous pour réaliser le blocage, comme montré à la figure 2.2. Le sens de rotation détermine quel écrou doit être solidarisé avec le disque. En effet, il faut que le couple agissant sur l'écrou tende à serrer le contre-écrou et non pas à

le dévisser. Le disque en bois est foré en trois points pour ainsi être boulonné sur le plateau auquel sont fixées les pales. Le maintien axial du plateau est effectué à l'aide d'un écrou et d'un rondelle.

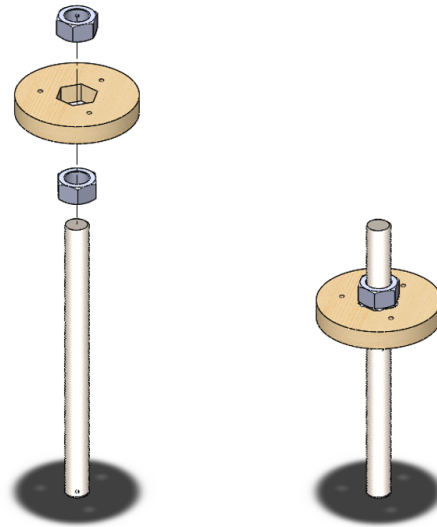


Figure 2.2: Vue éclatée et assemblage réalisé entre la tige filetée et le disque en bois

Les caractéristiques principales des tiges filetées disponibles dans les magasins de bricolage traditionnels sont les suivantes:

		Acier zingué	Acier inoxydable
Norme		DIN ¹ 976	DIN 975
Type		8.8	A2
Limite d'élasticité	[Mpa]	640	450
Limite de rupture	[Mpa]	800	700
Module de Young	[GPa]	210	190
Longueurs disponibles	[m]	1	1
Diamètre maximum disponible	[mm]	20	20
Masse volumique	[kg/m ³]	7700	7700
Prix	[€/kg]	~ 5	~ 12

Table 2.1: Caractéristiques des tiges filetées [5]

¹Deutsches Institut für Normung, organisme de normalisation allemand

Au vu des données reprises dans le tableau 2.1, le choix se porte sur une tige filetée en acier zingué qui présente des propriétés supérieures et à moindre coût.

En fonctionnement, l'axe de rotation sera soumis à différentes contraintes :

- Cisaillement et flexion dus à la force du vent
- Compression entre les deux plateaux due à la force centripète agissant sur les pales en rotation
- Torsion due au couple moteur généré par les pales et au couple résistant du moteur

Ces contraintes sont dépendantes de la vitesse de rotation et de la vitesse du vent et fluctuent selon la position angulaire. C'est pourquoi, en plus de devoir résister au cas le plus critique, il faut aussi que l'arbre résiste en fatigue. Une analyse de la résistance au flambage sera également effectuée au vu de l'importante charge de compression entre les deux plateaux.

2.1.1 Dimensionnement statique

L'objectif de cette démarche est de garantir que l'effet des contraintes sur le matériau ne mènera pas à des déformations plastiques. Il est donc primordial que la contrainte maximale reste inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Cela peut s'écrire sous forme mathématique suivant l'équation (2.1).

$$\sigma_{eq} \leq \frac{\sigma_{LE}}{k_{sec}} \quad (2.1)$$

avec :

- σ_{LE} la limite d'élasticité du matériau,
- k_{sec} un coefficient de sécurité défini dans la section 2.1.1.2,
- σ_{eq} la contrainte équivalente obtenue suivant le critère de Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (2.2)$$

avec σ la somme des contraintes de flexion et de compression et τ la somme des contraintes de torsion et de cisaillement.

2.1.1.1 Contraintes

Le cas le plus critique peut être ramené à un problème statique en deux dimensions d'un arbre sur deux appuis tel que celui de la figure 2.3. La gravité est négligée et les forces sont considérées comme ponctuelles.

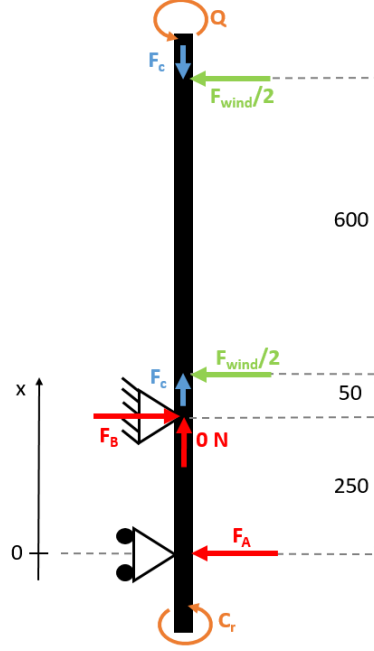


Figure 2.3: Schéma des différentes forces agissant sur l'axe

Les deux appuis représentent les deux roulements, positionnés en tenant compte de la longueur totale de l'axe (1m) ainsi que du dépassement nécessaire pour accoupler la génératrice.

Flexion et cisaillement

La force horizontale répartie au niveau des deux plateaux est due au vent et s'exprime suivant l'équation (2.3).

$$F_{wind} = \frac{1}{2} V_{\infty max}^2 \rho A = 56.25 \text{ N} \quad (2.3)$$

avec :

- $V_{\infty max}$ la vitesse maximale du vent, que l'on peut considérer égale à 25 m/s pour la Belgique et à l'intérieur des terres,
- ρ la masse volumique de l'air = 1.2 kg/m³ à une température de 20°C,

- A la surface sur laquelle agit le vent. Celle-ci résulte de la somme de trois fois l'aire d'une face de pale et de l'aire projetée des plateaux sur le plan normal au vent ¹, c'est-à-dire environ 0.15 m^2 .

Comme nous travaillons en statique, les sommes de forces et de moments de forces doivent être nulles. Ceci permet alors de calculer les réactions aux appuis et ensuite, par le principe de la coupure, de déterminer l'ensemble des efforts internes. Ceux-ci sont représentés sur la figure 2.4 .

$$F_A = 78.75 \text{ N}$$

$$F_B = 135 \text{ N}$$

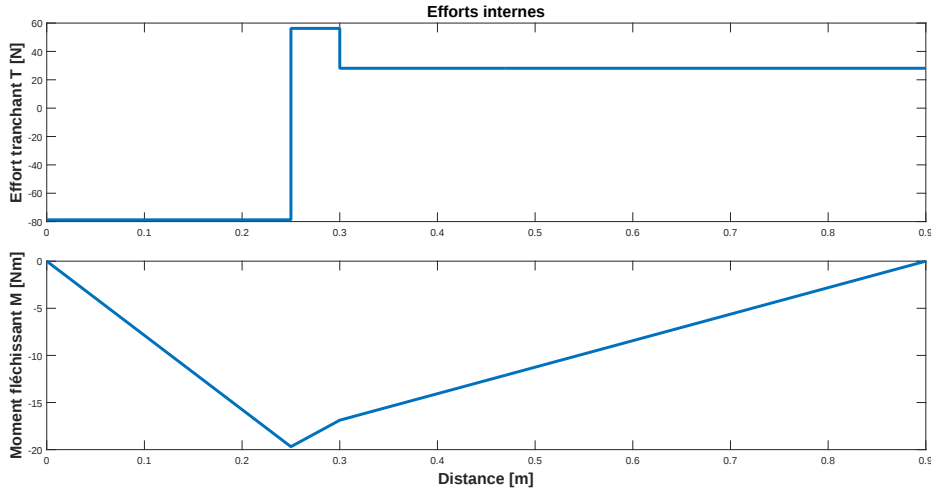


Figure 2.4: Diagramme des efforts internes. Effort tranchant et moment de flexion subis par l'axe en fonction de la position le long de ce dernier

Le cas étudié correspond à celui d'une poutre de section circulaire pleine. Les contraintes de flexion et de cisaillement sont alors données par les équations (2.4) et (2.5) respectivement, avec d le diamètre de l'axe, M le moment de flexion et T l'effort tranchant.

$$\sigma_{flexion} = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (2.4)$$

¹Il faudrait également considérer la surface réellement projetée sur le plan normal au vent lorsque l'on considère l'aire des pales. Cette approximation nous conduira donc à un très léger surdimensionnement.

$$\tau_{cisaillement} = \frac{4T}{\pi d^2} \quad (2.5)$$

La contrainte de cisaillement ne sera pas prise en compte dans la suite de ce développement. En effet, dans cette application, cette contrainte est négligeable par rapport aux autres.

Compression

En rotation, les pales vont subir une force centripète donnée par (2.6).

$$F_{centr} = m\omega^2 R \quad (2.6)$$

Sur le schéma simplifié (mais beaucoup plus contraignant) de la figure 2.5 la pale est décomposée en deux tiges articulées AB et BC de masse négligeable. Une masse ponctuelle est placée en B et est égale à la masse totale d'une pale (260 g). Ce système mécanique permet d'obtenir facilement une approximation de la force de compression agissant sur l'axe au niveau des plateaux:

$$F_c = 3 \times \frac{0.5 F_{centr}}{\tan 22.5^\circ}$$

ce qui donne pour une masse de 260 g et une vitesse de rotation de 687 RPM:

$$F_c = 3 \times \frac{0.5 \times 0.260 \times (687 \times \frac{2\pi}{60})^2 \times 0.312}{\tan 22.5^\circ} = 1.52 \text{ kN}$$

La contrainte de compression se calcule suivant (2.7).

$$\sigma_{compression} = \frac{4F_c}{\pi d^2} \quad (2.7)$$

Torsion

À partir de la vitesse de rotation de l'éolienne et de la puissance qu'elle produit, le couple Q exercé sur l'axe de rotation peut être déduit de l'équation (2.8). Lequel permet ensuite d'obtenir la contrainte de torsion selon (2.9).

$$Q = \frac{P}{\omega} = \frac{53}{\frac{2\pi}{60} 687} = 0.849 \text{ Nm} \quad (2.8)$$

$$\tau_{torsion} = \frac{16 Q}{\pi d^3} \quad (2.9)$$

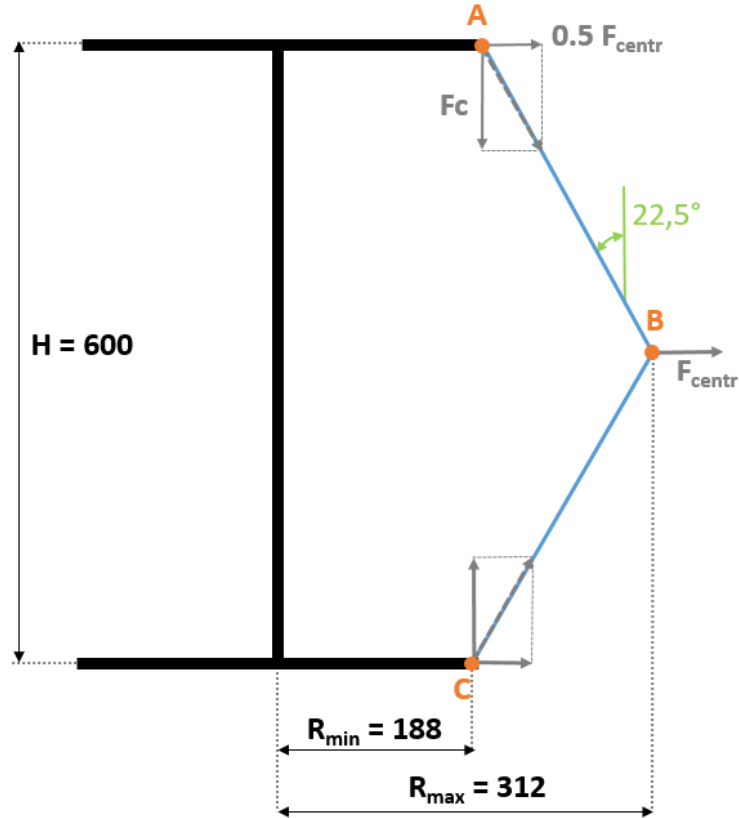


Figure 2.5: Effet de la force centripète

2.1.1.2 Coefficients de concentration de contraintes et de sécurité

Les variations de section d'une tige filetée entraînent des phénomènes d'augmentation locale des contraintes. Ces zones constituent souvent le site d'amorçage de fissures ou même de rupture brutale.

Afin de tenir compte de ces accroissements de contraintes, il convient d'utiliser des facteurs de correction définis comme le rapport de la contrainte maximale réelle dans la zone de discontinuité (entaille, trou, etc.) à la contrainte dans la section nette:

$$K_t = \frac{\sigma_{réel}}{\sigma_{nom}} \quad (2.10)$$

Dans le cas d'une barre cylindrique avec une rainure circonférentielle en forme de V (voir figure 2.6), ce qui correspond à une tige à filetage métrique, les coefficients de concentration de contraintes K_t sont fonction des rapports géométriques $\frac{2t}{D}$ et $\frac{2\rho}{D}$ mais également du type de contrainte. Ces valeurs numériques sont disponibles dans les tables réalisées par Nisitani et Noda [30].

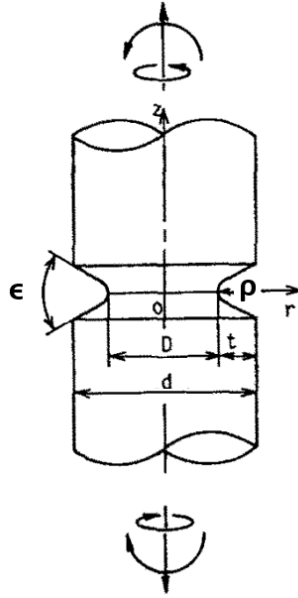


Figure 2.6: Caractéristiques géométriques d'une barre cylindrique avec rainure circonférentielle en forme de V [30]

Il est également recommandé de prendre en compte un facteur de sécurité. Ce dernier est fixé en fonction des critères suivants (voir [24]):

- Le degré d'incertitude par rapport à la charge: le coefficient permet de prendre en compte une éventuelle surcharge.
- Le degré d'incertitude par rapport à la résistance du matériau: les caractéristiques des matériaux renseignées dans les enseignes de grande distribution de bricolage ne sont pas excessivement fiables. De plus, elles peuvent légèrement varier en fonctionnement.
- Les incertitudes concernant les charges appliquées: certaines approximations et imprécisions peuvent être présentes dans nos considérations et calculs.
- Les conséquences humaines et économiques d'une défaillance: l'installation de l'éolienne ne se fera pas à proximité directe de personne (généralement en hauteur, sur un toit, etc.) et son arrêt n'aurait pas de répercussion économique.
- Le coût lié à une augmentation du coefficient de sécurité: l'objectif est de concevoir un produit à prix abordable.

L'évaluation de ces critères nous mène à fixer le coefficient de sécurité k_{sec} à 2. Ceci est préconisé lors de la conception d'objets fonctionnant dans un environnement ordinaire et dont les efforts et contraintes peuvent être déterminés.

2.1.1.3 Valeurs numériques

Les calculs de dimensionnement doivent être effectués de manière itérative étant donné que les coefficients de concentration de contraintes varient en fonction de la géométrie et donc des dimensions de l'axe.

Aussi, pour que l'utilisation d'une tige filetée soit envisageable, il faut que le diamètre minimum de l'axe déterminé sur base des formules de dimensionnement soit inférieur au diamètre maximal disponible, c'est-à-dire 20 mm.

Cette valeur sera utilisée comme valeur initiale de l'itération.

Une tige filetée M20 possède les dimensions suivantes (représentées sur la figure 2.6) :

$$\epsilon = 60^\circ$$

$$t = 2.165 \text{ mm}$$

$$\rho = 0.3125 \text{ mm}$$

et donc

$$\frac{2\rho}{d} = 0.0313$$

$$\frac{2t}{d} = 0.2165$$

cela permet d'obtenir les coefficients suivants :

$$K_{t/torsion} = 2.5$$

$$K_{t/compression} = 4.8$$

$$K_{t/flexion} = 4$$

En insérant les équations des contraintes (éq. (2.4), (2.7) et (2.9)) dans l'équation (2.2) l'expression pour la contrainte équivalente montre que la seule variable est le diamètre de l'axe. L'équation (2.1) nous permet alors de déterminer ce diamètre :

$$d \geq 13.7 \text{ mm} \quad (2.11)$$

2.1.2 Dimensionnement en fatigue

La variation de l'intensité du vent mais surtout la rotation du système conduisent à des variations temporelles des contraintes et des déformations. Celles-ci modifient les propriétés locales du matériau et peuvent provoquer l'amorçage et la propagation de fissures. Ce phénomène, appelé fatigue, pourrait ainsi entraîner la rupture du matériau malgré des contraintes inférieures à la limite d'élasticité.

Il est possible de réexprimer chaque contrainte sous forme d'une valeur moyenne σ_m et de son amplitude σ_a tel qu'illustré sur la figure 2.7.

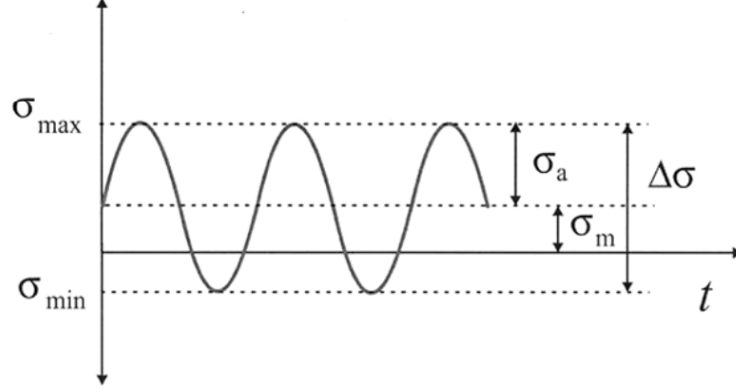


Figure 2.7: Illustration des notations utilisées pour les contraintes fluctuantes

Dans le cas d'un vent constant et où l'éolienne fonctionne à sa vitesse de rotation maximale, ces composantes sont :

$$\begin{aligned}\sigma_{a/flexion} &= \frac{32M}{\pi d^3} \\ \sigma_{m/flexion} &= 0\end{aligned}\tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{a/compression} &= 0 \\ \sigma_{m/compression} &= \frac{4F_c}{\pi d^2}\end{aligned}\tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{a/torsion} &= 0 \\ \sigma_{m/torsion} &= \frac{16Q}{\pi d^3}\end{aligned}\tag{2.14}$$

Il faut à nouveau tenir compte de coefficients de concentration de contraintes calculés suivant l'équation (2.15).

$$K_f = 1 + (K_t - 1)q\tag{2.15}$$

La variable q est déterminée à l'aide du graphique de la figure 2.8. Pour un rayon d'entaille de 0.31 mm (0.012 inch) et une limite de rupture de 800 MPa (115 ksi) le q obtenu vaut approximativement 0.65 et 0.8, selon la sollicitation considérée.

Juvinall [24] définit les contraintes équivalentes de la manière suivante :

$$\sigma_{ea} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2}\tag{2.16}$$

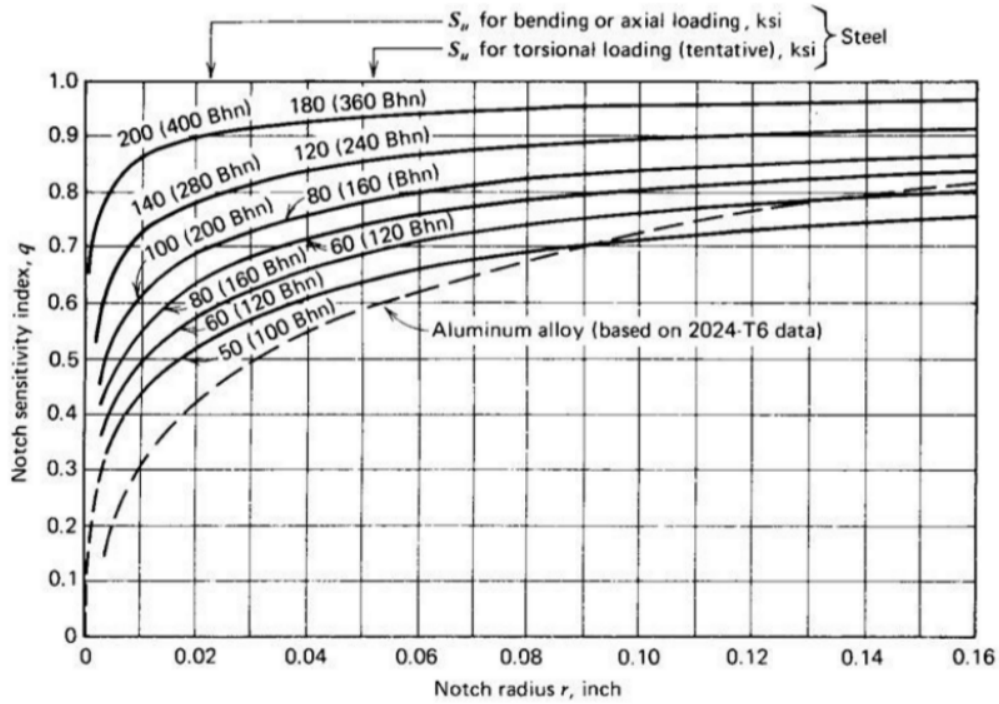


Figure 2.8: Courbes de sensibilité aux entailles

$$\sigma_{em} = \frac{\sigma_m}{2} + \sqrt{\tau_m^2 + \left(\frac{\sigma_m}{2}\right)^2} \quad (2.17)$$

Les calculs de dimensionnement sont généralement effectués sur base du diagramme d'endurance de Haigh (voir figure 2.9). L'abscisse correspond à la contrainte moyenne, tandis que l'ordonnée est l'amplitude de la contrainte alternée. La limite de fatigue peut alors être représentée de plusieurs manières :

1. *La droite de Soderberg* qui est trop pessimiste,
2. *La droite de Goodman* qui va au delà de la limite d'élasticité,
3. *Le polygone limite* défini par la droite de Goodman et par une droite à 45° passant par la limite d'élasticité. C'est cette limite qui sera utilisée dans les calculs.

Pour tracer ce diagramme, il est nécessaire de calculer la limite d'endurance S_n

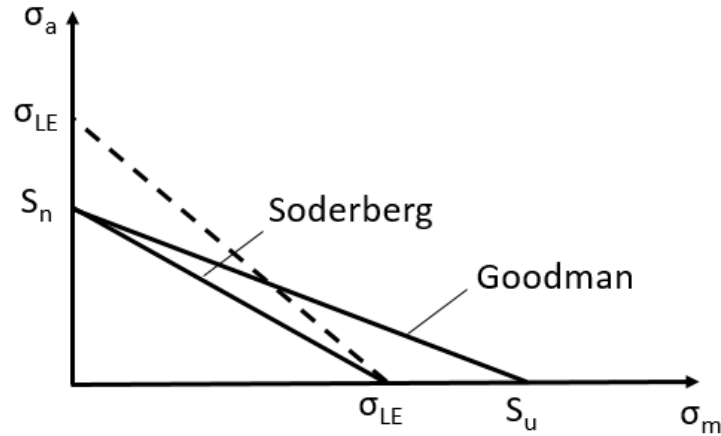


Figure 2.9: Diagramme de Haigh

qui, pour un million de cycles¹, est donnée par la formule suivante :

$$S_n = S'_n C_L C_G C_S C_T C_R \simeq 220 MPa \quad (2.18)$$

où

- $S'_n = 0.5S_u$, avec S_u la limite de rupture du matériau,
- $C_L = 1$, le facteur de charge,
- $C_G = 0.9$, le facteur gradient (pour $10mm < d < 50mm$),
- $C_S = 0.75$, le facteur de surface déterminé sur base du graphique de la figure 2.10 pour une limite de rupture de $800 MPa$ ($\simeq 115ksi$) et un acier usiné par roulage à froid,
- $C_T = 1$, le facteur de température
- $C_R = 0.814$, le facteur de fiabilité (correspond à une fiabilité de 99.9%).

Le diagramme de Haigh correspondant à cette application est tracé sur la figure 2.11 où sont représentées les droites de deux points critiques de l'axe: le roulement supérieur et le plateau inférieur. Les intersections avec le polynôme li-mite permettent de connaître les contraintes maximales admissibles et d'affirmer que l'axe doit avoir un diamètre supérieur à **17.6 mm**.

¹Un million de cycles correspond à une durée de vie "infinie". Cela signifie que la pièce ne cassera pas en fatigue.

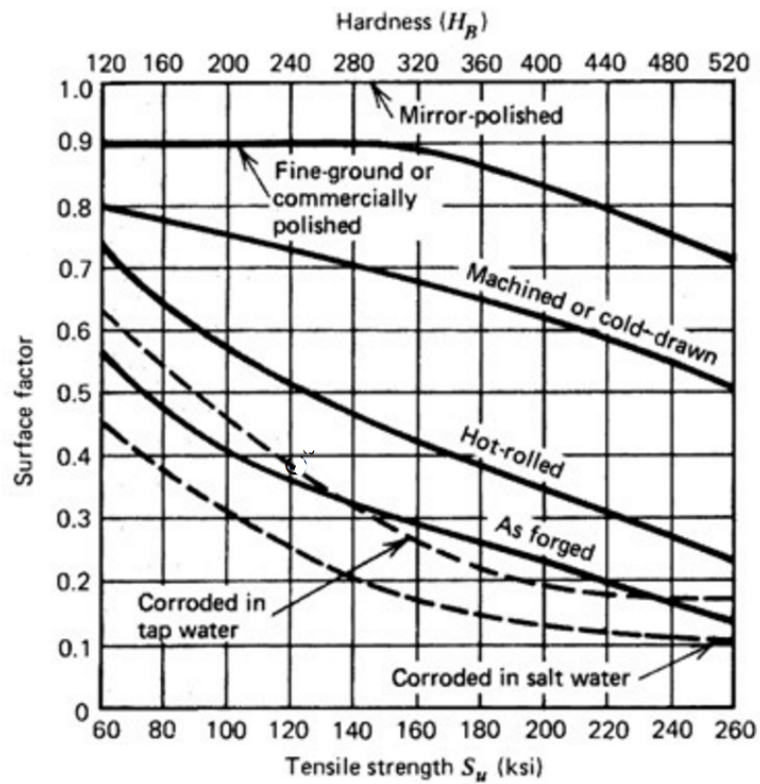


Figure 2.10: Réduction de la limite d'endurance due à la finition de surface pour les aciers

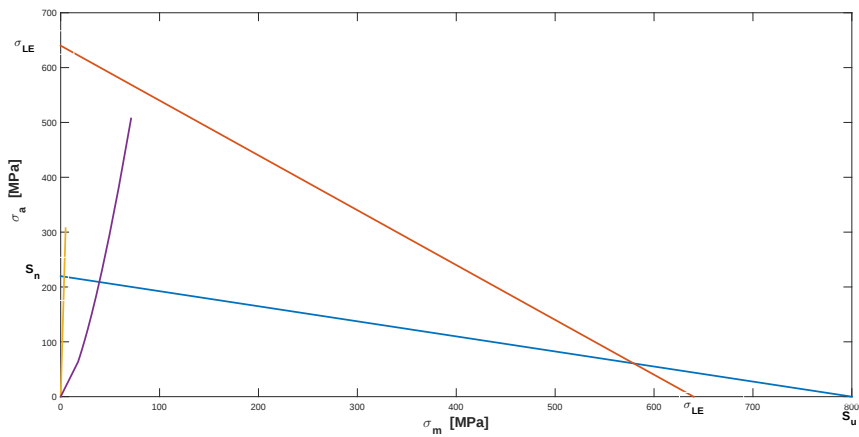


Figure 2.11: Droites des contraintes représentées sur le diagramme de Haigh

2.1.3 Dimensionnement au flambement

L'axe central soumis à une compression normale aura tendance à fléchir et à se déformer dans une direction perpendiculaire à la charge de compression. Ce phénomène est appelé le flambement. À la différence des dimensionnements en statique et en fatigue, il est considéré ici que les efforts s'appliquent à l'axe déformé.

La charge critique théorique de flambement est alors donnée par la formule d'Euler:

$$F = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (2.19)$$

avec :

- F la force de compression
- E le module de Young du matériau
- I le moment d'inertie de la section, égal à $\frac{\pi d^4}{64}$ dans notre cas
- l la longueur de flambement de l'axe. En se référant au cas d'une poutre comprimée entre deux liaisons pivots tel que présenté sur la figure 2.12, cette longueur est égale à celle de la poutre comprimée, soit $0.6m$ pour l'éolienne considérée.

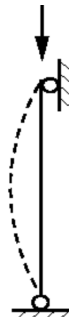


Figure 2.12: Flambement d'une poutre soumise à une compression entre deux liaisons pivots

En tenant compte d'un coefficient de sécurité égal à 2, le diamètre minimum de l'axe requis pour ne pas dépasser la charge critique de flambement est de **12.2 mm**.

Conclusion

Le dimensionnement en fatigue est le plus contraignant et préconise l'utilisation d'un axe de diamètre supérieur à 17.6 mm . Afin de garder une marge de sécurité supplémentaire nous choisirons un axe de **20 mm**

2.2 Pales

Les trois pales fabriquées en ABS par impression 3D présentent deux inconvénients majeurs :

Tout d'abord, la résistance anisotrope du matériau ainsi que le risque de délamination. Ensuite, le problème de l'assemblage tant au niveau des plateaux qu'au niveau des différentes sections de pales. En effet, il n'est pas possible d'imprimer la pale d'une seule pièce avec l'imprimante 3D considérée pour la fabrication de notre éolienne (voir section 3.1.3).

La solution retenue afin de s'affranchir de ces limitations est de rajouter deux âmes en acier au travers des pales, d'y arrimer les plateaux en ses leurs extrémités et de précontraindre la pale (voir figure 2.13). De cette manière, la résistance des pales est renforcée tout en permettant un meilleur assemblage et un meilleur calage.

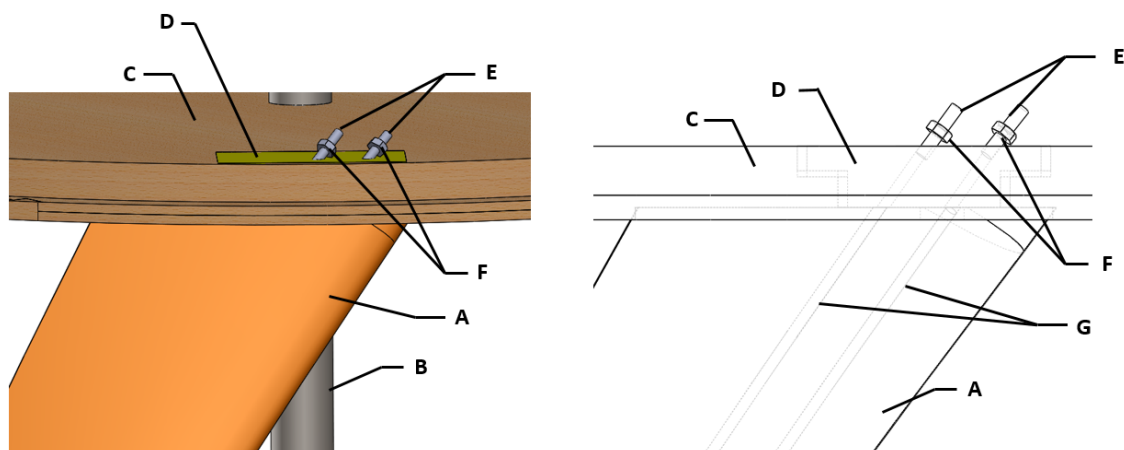


Figure 2.13: Représentations de l'assemblage entre les pales et le plateau à l'aide de tiges filetées, avec A: la pale, B: l'axe de rotation, C: le plateau, D: une pièce imprimée en 3D pour guider les tiges filetée, E: les tiges filetée M3, F: les écrous M3 et G: les passages des tiges filetées dans la pale

L'emploi de tiges filetées a été préféré à celui de câbles pour des raisons de facilité de mise en œuvre. Alors que les câbles nécessitent l'utilisation de tendeurs pour assurer un bon assemblage, les tiges filetées requièrent simplement l'utilisation d'écrous. Une pièce imprimée en 3D est positionnée dans le plateau afin de donner la bonne direction aux tiges filetées. En effet, il aurait été compliqué de forer le plateau avec une assez bonne précision angulaire.

Afin d'épouser la courbe définie par la pale et de s'insérer dans l'épaisseur du profil,

il est nécessaire que la section des tiges filetées ne soit pas trop importante. Un dimensionnement statique est effectué de la même manière que celui de l'axe de rotation. En ne considérant que la contrainte de traction issue du schéma simplifié de la figure 2.5, le diamètre minimum requis est inférieur à 2 mm . Le choix de tiges à filetage métrique de 3 mm de diamètre¹ est finalement adopté.

En plus de l'âme en tiges filetées, des tenons et mortaises, représentés à la figure 2.14, sont réalisés sur les surfaces d'assemblage afin de fixer le positionnement des différentes sections de pales entre elles.

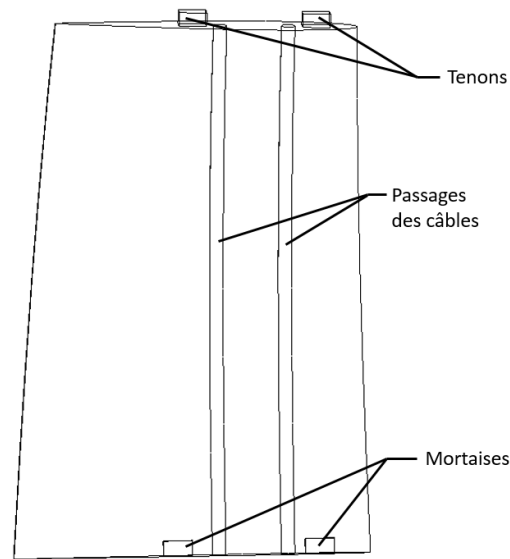


Figure 2.14: Principe d'assemblage entre les différentes sections de pale

¹les plus fines disponibles dans le commerce

2.3 Plateaux

Les plateaux ont pour fonction le maintien des pales dans leur position ainsi que la transformation et la transmission des forces aérodynamiques agissant sur les pales en un couple mécanique sur l'axe. Ils devront également être capables de reprendre des efforts de flexion importants.

Au vu de la dimension et de la résistance nécessaire, l'utilisation de l'impression 3D semble inadaptée pour réaliser ces pièces-ci. En restant toujours dans l'optique d'une fabrication accessible à tous, une géométrie simple et non profilée a été privilégiée. Pour cette raison, des plateaux cylindriques pleins ont été préférés à trois bras. Malgré la plus grande surface mouillée, la traînée parasite produite devrait être moindre. De plus, la tenue mécanique sera meilleure.

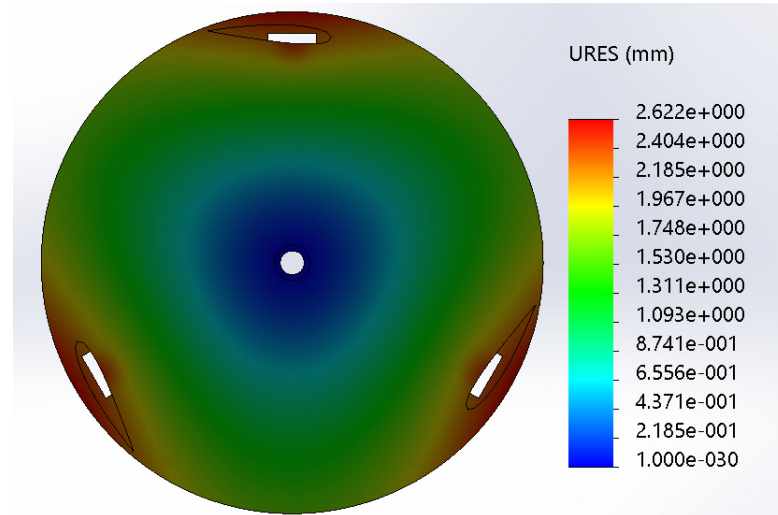
Afin de réaliser un bon positionnement des pales, ce qui est primordial pour imposer l'angle d'attaque souhaité, l'empreinte de la pale a été fraisée dans les plateaux (visible sur la figure 2.15) et les pales viennent s'y emboîter.

Il est également important que les plateaux soient correctement centrés sur l'axe de rotation. La fabrication de ceux-ci requiert donc une précision relativement importante. C'est la raison pour laquelle la découpe laser a été utilisée.

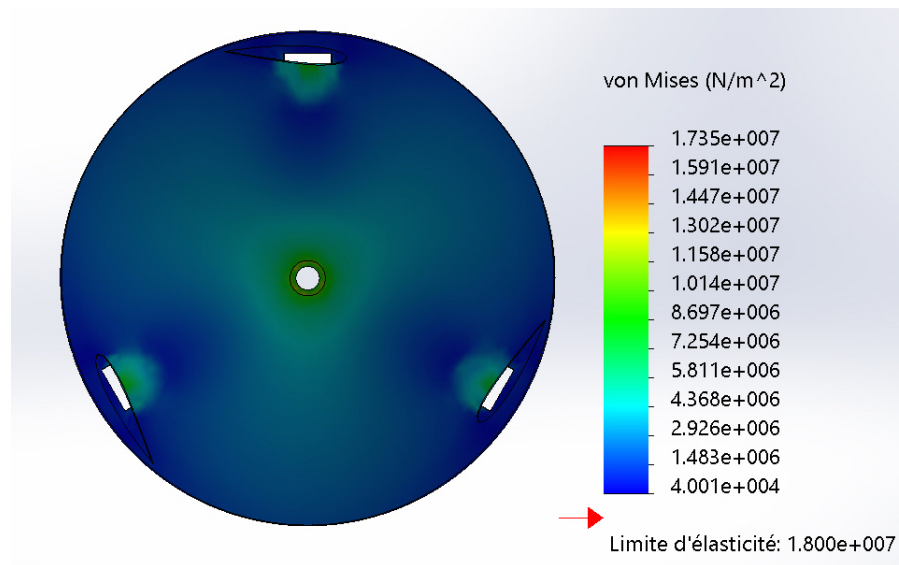
L'inconvénient de ce procédé de fabrication est le choix des matériaux compatibles. Néanmoins, le MDF¹ semble présenter des caractéristiques convenables pour cette application, à condition de superposer plusieurs couches pour obtenir l'épaisseur souhaitée. De plus, le MDF possède des propriétés physiques quasi homogènes, notamment sa densité. Cela permet d'éviter une masse répartie non uniformément sur le volume en rotation qui engendrerait des phénomènes de balourd. Finalement, le MDF est un matériau très répandu dans le commerce et donc le coût reste assez faible.

Le dimensionnement des plateaux a été effectué au moyen de simulations par éléments finis sur le logiciel *Solidworks*. Les figures 2.15 montrent le comportement d'un plateau d'une épaisseur de 18 mm soumis aux forces de compression des pales en rotation. Les déformations sont raisonnables (moins de 3 mm au plus grand rayon) et les contraintes restent inférieures à la limite d'élasticité, tout en considérant un facteur de sécurité égal à 2.

¹Medium Density Fiberboard: panneau de fibres de bois à moyenne densité.



(a)



(b)

Figure 2.15: Déplacements et contraintes calculés par *Solidworks simulation*

2.4 Roulements

2.4.1 Critères de choix

Les roulements ont pour objectif de maintenir l'arbre en position tout en lui permettant de tourner suivant son axe de rotation. Ils doivent être choisis en fonction des critères suivants [32] :

- **Espace disponible:** La dimension axiale ne doit pas être trop importante étant donné la longueur limitée de l'axe.
- **Charge:** Les roulements seront soumis à une charge radiale élevée dépendante de la vitesse du vent ainsi qu'à une charge axiale modérée (reprise par un seul roulement) due à la gravité.
L'intensité de cette charge va déterminer la taille du roulement.
- **Déversement admissible:** Un défaut d'alignement entre l'arbre et le logement pourrait se produire suite à un fléchissement de l'arbre sous sa charge ou à cause d'un mauvais alignement des roulements.
- **Précision:** L'éolienne ne requiert pas une grande précision.
- **Vitesse admissible:** La vitesse de rotation maximale se situe aux environs de 700 tours par minute, ce qui ne devrait pas générer une augmentation excessive de la température de fonctionnement.
- **Silence de fonctionnement:** Il s'agit d'un des intérêts des VAWT par rapport aux HAWT. Des roulements aussi silencieux que possible seront donc préférés.
- **Rigidité:** Une légère déformation du roulement n'aurait pas d'effet sur le fonctionnement du système.
- **Possibilité de déplacement axial:** L'axe ne subira pas de déplacement axial.
- **Montage et démontage:** Le montage se fait de manière aisée. L'ajustement entre la tige filetée et la bague intérieure permet un petit jeu tandis que celui entre le support et la bague extérieure présente un léger serrage. La fréquence de remplacement ne devrait pas être élevée.
- **Étanchéité:** Dans des conditions réelles de fonctionnement, l'étanchéité des roulements aura un impact sur les performances et la durée de vie du système. Pour la réalisation d'un premier prototype ce critère n'est pas primordial.

- **Prix:** L'idée est de pouvoir fabriquer sa propre éolienne avec peu de moyens, aussi bien techniques que financiers.

Sur base de ces critères et de la table 2.2 reprenant quelques éléments de la matrice du catalogue SKF [32], l'utilisation d'un roulement rigide à billes pour le roulement supérieur et d'un roulement à rouleaux cylindriques pour celui inférieur semble la plus appropriée.

	Charge radiale	Charge axiale	Charge combinée	Vitesse élevée	Bruit	Prix
Rigide à billes	+	+	+	+++	+++	+++
À rouleaux cylindriques	++	- -	- -	++	++	++
À rouleaux coniques	++	++	+++	+	+	-

Table 2.2: Types de roulements et caractéristiques

2.4.2 Montage

Une règle générale de montage des roulements consiste à réaliser un assemblage avec serrage sur la bague du roulement qui tourne par rapport à la charge radiale. Dans ce cas-ci, la charge radiale est en rotation tout comme la bague intérieure. Il faut donc serrer la bague extérieure (voir figure 2.16(a)).

Le maintien axial de l'arbre est quant à lui effectué en deux points uniquement de manière à former un montage isostatique (voir figure 2.16(b)). Seul le roulement supérieur reprend donc une charge axiale.

Les roulements sont logés dans deux pièces imprimées en 3D représentées sur la figure 2.17. Ces dernières sont boulonnées à un élément fixe et constituent, avec les roulements, des paliers nécessaires au support et au guidage de l'arbre en rotation. C'est le positionnement de ces deux pièces qui détermine l'alignement de l'arbre. La pièce qui supporte le roulement supérieur reprend une charge axiale plus importante, c'est pourquoi une nervure est ajoutée, pour augmenter sa surface de contact.

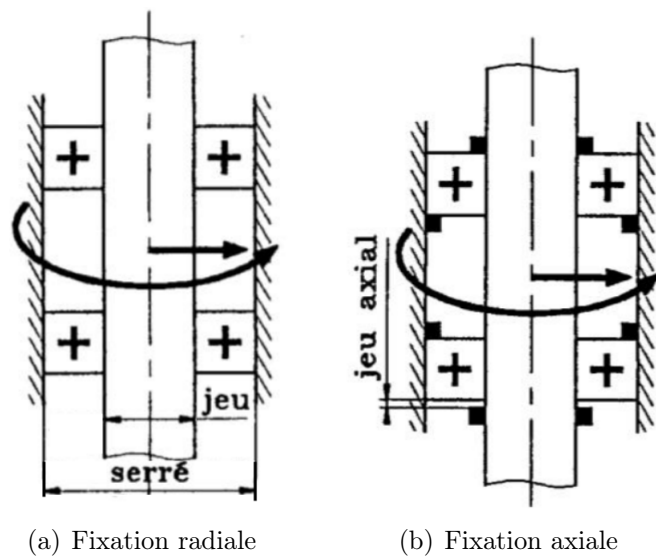


Figure 2.16: Ajustement des roulements

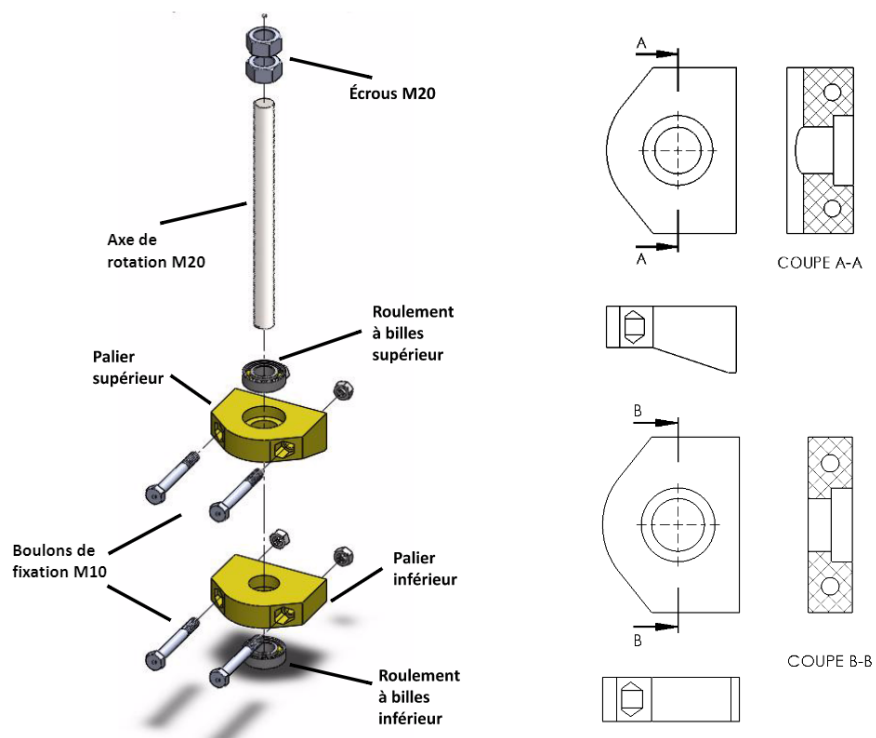


Figure 2.17: À gauche : l'assemblage effectué au niveau des roulements, à droite : les plans des deux supports

2.4.3 Dimensionnement

En fonction du diamètre de l'axe et du type de roulement, nous avons choisi un roulement rigide à billes SKF 6004 et un roulement à rouleaux cylindriques SKF NU 204 ECP représentés aux figures 2.18 et 2.19 respectivement.

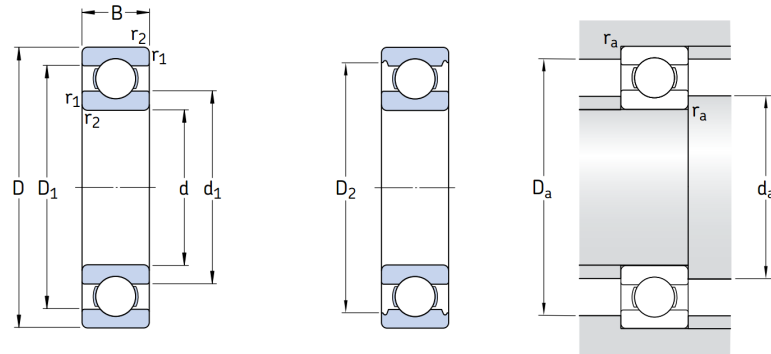


Figure 2.18: Roulement rigide à billes à une rangée SKF 6004 [32]

Les caractéristiques principales du roulement à billes sont les suivantes:

$$D = 42 \text{ mm}$$

$$B = 12 \text{ mm}$$

$$d_1 = 27.2 \text{ mm}$$

$$C = 9.95 \text{ kN}$$

$$\text{prix} \simeq 4 \text{ €}^1$$

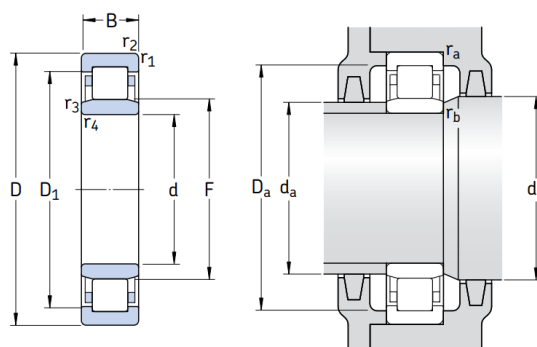


Figure 2.19: Roulement à rouleaux cylindriques SKF NU 204 ECP [32]

¹Prix TVA comprise pour la Belgique selon [12]

Celles du roulement à rouleaux sont:

$$D = 47 \text{ mm}$$

$$B = 14 \text{ mm}$$

$$F = 26.5 \text{ mm}$$

$$C = 25.1 \text{ kN}$$

$$\text{prix} \simeq 29 \text{ €}^1$$

Il reste à vérifier que la charge dynamique de base, C , est adaptée afin de garantir une durée de vie raisonnable pour notre application. Dans le cas d'une machine fonctionnant 8 heures chaque jour, Juvinall [24] préconise de dimensionner les roulements pour une durée de vie de 20 000 heures. Cette durée de vie varie en fonction de la charge appliquée selon l'équation (2.20):

$$L = K_r L_R (C/F_e)^p \quad (2.20)$$

qui peut être réécrite sous la forme :

$$C = F_e (L/K_r L_R)^{1/p} \quad (2.21)$$

avec :

- L , la durée de vie en nombre de tours. Dans le cas critique, 20 000 heures de fonctionnement correspondent à 840×10^6 tours.
- K_r , un facteur de fiabilité égal à 1 lorsqu'une fiabilité de 90% est souhaitée.
- L_R , la durée de vie pour une charge égale à la charge dynamique de base. $L_R = 10^6$ tours pour les roulements du catalogue SKF [32].
- F_e , la charge radiale équivalente appliquée au roulement (en kN).
- $p = 3$ pour les roulements à billes et $10/3$ pour ceux à rouleaux.

Il faut ensuite considérer deux cas différents pour les roulements supérieur et inférieur:

¹Prix TVA comprise pour la Belgique selon [12]

1. Roulement supérieur

Celui-ci se trouve en présence d'une charge radiale de $135N$ et d'une charge axiale estimée à $60N$ (En considérant une masse d'environ $6kg$).

La charge équivalente est donnée par l'équation (2.22) issue de [24] et vaut $F_e = 149N$.

$$F_e = \begin{cases} F_r & \text{si } 0 < F_t/F_r < 0.35 \\ F_r \left[1 + 1.115 \left(\frac{F_t}{F_r} - 0.35 \right) \right] & \text{si } 0.35 < F_t/F_r < 10 \\ 1.176F_t & \text{si } F_t/F_r > 10 \end{cases} \quad (2.22)$$

À l'aide de l'équation (2.21), la charge dynamique de base requise obtenue est égale à $1.49kN$, ce qui est bien inférieur à celle du roulement SKF 6004.

2. Roulement inférieur

Celui-ci est uniquement soumis à une charge radiale de $77N$. En appliquant l'équation (2.21) la charge dynamique de base requise est de $0.74kN$, ce qui est à nouveau bien inférieur à celle du roulement considéré.

En conclusion, il convient de remarquer que les roulements sont nettement surdimensionnés. Il est donc tout à fait envisageable d'utiliser un deuxième roulement à billes à la place de celui à rouleaux de manière à diminuer les coûts tout en gardant des performances suffisantes.

2.5 Générateur

L'accouplement entre le générateur et l'éolienne est assuré par une pièce imprimée en 3D. Celle-ci est solidarisée d'une part au moyen d'une clavette et d'autre part par un emboîtement autour d'un écrou vissé sur la tige filetée.

Afin d'éviter que cet écrou ne se déplace le long de la tige filetée sous l'effet du couple moteur de l'éolienne et du couple résistant du générateur, il convient de le bloquer à l'aide d'un contre-écrou. Étant donné le sens de rotation de l'éolienne, il faut que l'accouplement se fasse sur l'écrou supérieur (voir coupe de la figure 2.20). Cette pièce ne permet pas de désalignement ni de décalage angulaire entre les deux arbres en rotation. Il convient dès lors d'accorder un soin particulier au positionnement des arbres, faute de quoi les roulements et les pièces qui les supportent seront soumis à des efforts supplémentaires.

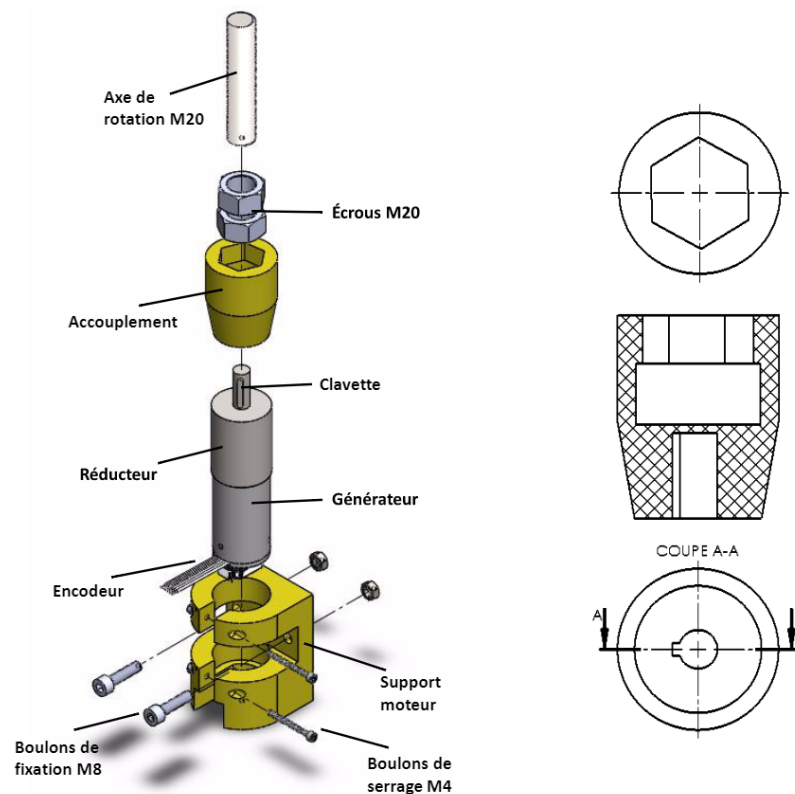


Figure 2.20: À gauche : vue éclatée de l'assemblage du générateur, à droite : coupe de la pièce d'accouplement imprimée en 3D

Le moteur est fixé à l'aide d'un support également imprimé en 3D qui peut ensuite

être boulonné sur un élément fixe. Deux vis supplémentaires permettent d'effectuer un serrage du support sur le moteur afin qu'il soit correctement maintenu. La charge axiale sur ce support ne sera due qu'au propre poids du moteur.

Chapitre 3

Procédés de prototypage rapide

Un FabLab est un espace ouvert au public dans lequel sont mis à disposition plusieurs outils pour la conception d'objets en tout genre. Ces espaces accueillent aussi bien des entrepreneurs que des designers, étudiants, bricoleurs, etc. et constituent un lieu de rencontre et de création entre personnes désireuses de créer leurs propres objets à l'aide de nouveaux outils de fabrication numérique. Ces laboratoires sont de plus en plus populaires dans les universités et grandes villes.

À Louvain-La-Neuve, par exemple, un FabLab est ouvert depuis 2014 au cœur de l'université et est équipé des machines suivantes: découpeuse laser, imprimantes 3D, fraiseuse numérique, défonceuse numérique et découpe vinyle.

Dans ce chapitre, le procédé d'impression 3D est exposé et une analyse des différents matériaux et outils disponibles est fournie afin de choisir le matériaux qui répondra au mieux à nos besoins. Les spécifications de la découpeuse laser seront également exposées.

3.1 Impression 3D

La fabrication additive, ou plus communément appelée impression 3D, est un procédé de fabrication assez récent¹ offrant de nouvelles opportunités de design. Étant donné que ce procédé permet uniquement de fabriquer les objets un par un, il est intéressant pour la production de pièces uniques et personnalisées ou pour des petites séries d'objets. D'autres procédés tels que le moulage, forgeage, etc. sont beaucoup plus adaptés lorsqu'il s'agit de fabriquer des milliers de copies d'une même pièce.

¹L'impression 3D est née en 1984 et est devenue disponible au grand public en 2009 [11].

3.1.1 Méthode: Fused deposition modeling

Parmi tous les procédés de fabrication additive, le plus populaire est le FDM (Fused Deposition Modeling) et est celui qui sera utilisé dans le cadre de ce travail. Le principe du FDM est de construire la pièce "couche par couche". À partir d'un fichier numérique 3D (fichier STL¹), un logiciel est utilisé afin de fractionner le modèle en plusieurs fines couches et de le rendre déchiffrable par la machine. Le design à imprimer est ensuite envoyé couche par couche à l'imprimante.

Cette technique consiste à extruder de la matière fondue grâce à une buse chauffée entre 160°C et 400°C . Lors du contact avec la matière précédemment déposée ou avec la plateforme d'impression, la matière extrudée se lie en redevenant solide. Ceci est illustré sur la figure 3.1.

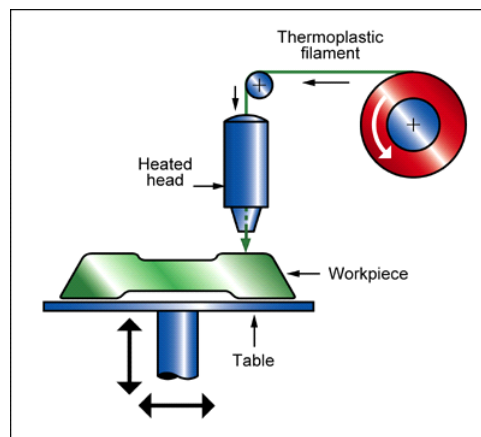


Figure 3.1: Procédé "Fused Deposition Modeling" - [Annexe B]

Cette technique peut se diviser en trois étapes:

- Pré-process: Le logiciel découpe le modèle 3D en tranches, le positionne correctement sur le plateau et calcule la trajectoire du filament et d'un éventuel support.
- Process: La buse chauffe le thermoplastique et le dépose en couches ultra fines le long de la trajectoire. Lorsqu'un support est nécessaire, la machine pose soit le même matériau en plus faible densité afin qu'il soit possible de l'enlever facilement une fois la pièce finie, soit un autre matériau soluble.
- Post-process: L'utilisateur casse le support ou le dissout dans un bain de détergent, la pièce est ainsi prête à l'emploi.

¹Format utilisé dans les logiciels de stéréolithographie. Ce format de fichier ne décrit que la surface d'un objet en trois dimensions.

Cette technologie est relativement propre et simple à utiliser. De plus, elle offre de nombreuses possibilités de géométries complexes qui peuvent poser problème pour des techniques de fabrication standard.

Une fiche technique de ce procédé de fabrication provenant du logiciel CES Selector se trouve à l'annexe B.

3.1.2 Matériaux

Les deux matériaux les plus souvent rencontrés lorsque l'on parle de FDM sont le PLA et l'ABS (respectivement Polylactic Acid et Acrylonitrile Butadiène Styrène). Ces deux matériaux sont des thermoplastiques ce qui signifie qu'ils deviennent ductiles lorsqu'ils sont chauffés à haute température et cela leur permet de prendre la forme désirée avant de refroidir. Certaines imprimantes sont compatibles avec les deux alors que d'autres n'en acceptent qu'un seul. Il semble donc essentiel d'analyser les atouts et défauts de chacun avant de sélectionner l'imprimante à utiliser. Les données proviennent du logiciel CES Edupack et les fiches techniques sont disponibles à l'annexe B.

Le PLA est respectueux de l'environnement, en effet il est issu de matériaux recyclés tels que l'amidon de maïs ou la canne à sucre et est bio-dégradable. L'ABS, quant à lui, est un matériau biphasé obtenu en mélangeant un co-polymère styrène-acrylonitrile et un élastomère à base de polybutadiène.

La température de transition vitreuse du PLA se situe entre $52^{\circ}C$ et $60^{\circ}C$ ce qui signifie qu'il n'est pas très résistant à la chaleur. Notons qu'il est également sensible à l'humidité, en effet un filament trop humide peut produire des petites bulles et de la vapeur lors de l'extrusion. Il est dès lors préférable de le conserver dans un endroit sec avant l'impression. L'ABS est plus résistant à la chaleur car il ne commence à ramollir qu'à partir de $90^{\circ}C$.

Le PLA est un matériau qui ne se plie pas et qui a tendance à casser facilement contrairement à son concurrent qui lui se plie facilement (élongation à la rupture de 2.5% et 20% respectivement).

Le matériau retenu servira, entre autres, à fabriquer les pales de l'éolienne et doit donc pouvoir résister à des efforts assez importants ainsi qu'à la chaleur. L'ABS semble par conséquent être plus adapté que le PLA pour la construction d'une éolienne.

3.1.3 Imprimantes à disposition

Les deux imprimantes disponibles au Makilab sont la *bq Witbox* et la *Up Mini* (voir figure 3.2). Leurs caractéristiques respectives sont reprises dans la table 3.1. Notons que l’université possède également sa propre imprimante: une *fortus 250 mc*.

	Matériau	Volume [mm^3]	Résolution [mm]	Support	Coûts
<i>bq Witbox</i> [8]	PLA	$297 \times 210 \times 200$	$0.2 - 0.3$	PLA	0.1 €/g
<i>Up Mini</i> [1]	ABS	$120 \times 120 \times 120$	$0.2 - 0.35$	ABS	0.1 €/g
<i>Fortus 250 mc</i> [6]	ABSplus	$254 \times 254 \times 305$	$0.178 - 0.33$	Soluble	$15 \text{ €} + 0.5 \text{ €/g}$

Table 3.1: Caractéristiques des imprimantes 3D disponibles

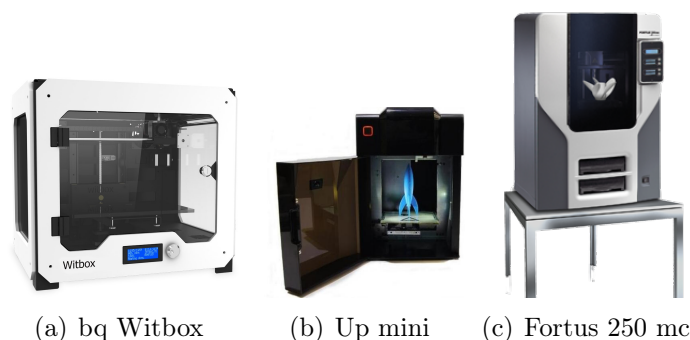


Figure 3.2: Imprimantes 3D

Suite à l’analyse préalable des matériaux, il convient d’éliminer la *bq Witbox* étant donné que celle-ci utilise exclusivement le PLA. Bien que cette imprimante offre un volume d’impression intéressant, il n’est pas envisageable d’utiliser du PLA pour la construction d’une éolienne. En effet, ce matériau est cassant et résiste mal à la chaleur.

Concernant les deux imprimantes restantes, la *fortus* possède un volume d’impression quatre fois plus étendu que la *Up mini* et est plus précise. De plus, le matériau de support de la *fortus* est un matériau soluble, contrairement à la *Up* qui utilise de l’ABS en plus faible densité. Il est plus aisé d’éliminer du support soluble plutôt que manuellement et le fini de surface est par conséquent meilleur. En revanche, les coûts de fabrication liés à la *fortus* sont plus de cinq fois plus élevés que pour la *Up*, la rendant moins accessible. Dès lors que l’accessibilité des procédés de fabrication est au cœur même de l’objectif de ce travail, l’imprimante sélectionnée se doit d’être abordable. Il convient donc de sélectionner la *Up mini*. Par ailleurs,

celle-ci est disponible dans la plupart des Fablab, contrairement à la *fortus* qui est une imprimante professionnelle.

L'unique contrainte à laquelle il faudra faire face est le petit volume de travail disponible.

3.1.4 Paramètres d'impression

Avant d'imprimer une pièce en 3D, l'utilisateur doit déterminer plusieurs paramètres d'impression. Ceux-ci influenceront le temps d'impression, la résistance, le fini de surface ainsi que les tolérances de la pièce [36] [16].

Sens de l'impression

Étant donné qu'un objet imprimé en 3D est composé de plusieurs couches, sa résistance n'est pas la même dans toutes les directions: il est plus fragile entre les couches que dans les autres orientations. Lorsqu'elles sont soumises à des contraintes extrêmes, les couches peuvent en effet se délaminer.

Il faut dès lors en tenir compte lors du positionnement de la pièce afin que les couches soient orientées correctement par rapport à la direction de la plus grande contrainte.

Un autre critère en lien avec le positionnement est le décollement de la première couche. Il arrive que, lors de l'impression, la pièce se décolle partiellement du plateau, comme illustré sur la figure 3.3.

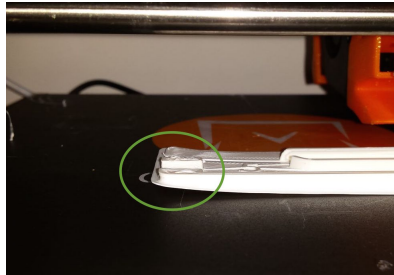


Figure 3.3: Décollement partiel lors d'une impression

Ce phénomène est dû au refroidissement parfois trop rapide de la pièce. En effet, lorsque la pièce refroidit elle se contracte et si cela est trop rapide, l'adhérence au plateau n'est pas suffisante pour maintenir la première couche plane. Cet effet est d'autant plus important sur des grandes pièces car le centre a tendance à refroidir plus lentement que l'extérieur. Ce phénomène peut également se produire entre les différentes couches. Le décollement peut s'avérer être très critique pour des pièces à

faibles tolérances. Dans ce cas, il faut alors essayer de poser la surface la plus petite sur le plateau.

En fonction du positionnement, certaines parties peuvent ou non se retrouver en porte-à-faux et donc nécessiter un matériau de support. Afin de minimiser ce dernier, certaines orientations peuvent s'avérer être préférables.

Pour toutes ces raisons, le positionnement de la pièce est très important et doit résulter d'un compromis entre orientation des couches, décollement de la pièce et utilisation de support.

Épaisseur de couche

Les différentes épaisseurs de couches de l'imprimante sont: 0.20, 0.25, 0.30 et 0.35 *mm*. Plus la couche est fine, plus le fini de surface de la pièce est lisse et plus les dimensions sont précises mais le temps d'impression est par conséquent plus long étant donné que le nombre de couches est plus important. L'impression des pales requiert la meilleure précision possible, c'est-à-dire des couches de 0.20 *mm*.

Remplissage

Pour la *Up mini*, l'épaisseur des parois des pièces est fixée à 1.50 *mm* alors que l'intérieur est rempli d'une structure en "nid d'abeilles" et est paramétrable. La *Up mini* possède plusieurs densités différentes: *low*, *medium-low*, *medium-high* et *high*, comme illustré sur la figure 3.4.

Plus le remplissage est dense, plus le temps d'impression est important et plus la masse volumique de la pièce est élevée. La résistance de la pièce dépend de la densité ainsi que de la direction de remplissage: parallèle à une direction pour mieux résister aux contraintes dans cette direction, structures carrées pour diminuer l'anisotropie ou structures hexagonales pour résister à la compression.

Lorsque l'utilisateur détermine la densité du matériau pour l'intérieur de sa pièce, il doit donc faire un compromis entre résistance de la pièce, temps d'impression et coût. En guise d'exemple, la table 3.2 reprend, pour les différentes densités, la durée d'impression, la masse et le coût d'impression d'un cube de 30 *mm* de côté ayant une épaisseur de couche de 0.2 *mm*. Pour l'impression des différents composants de l'éolienne une densité *medium-high* a été choisie.

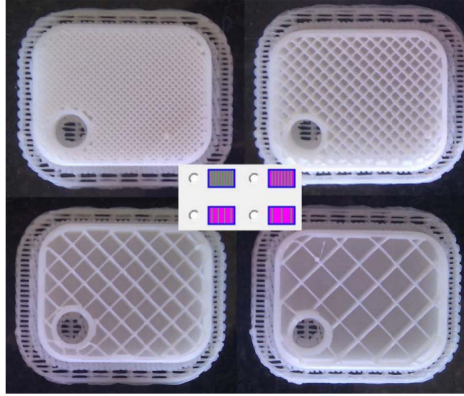


Figure 3.4: Différentes densités de remplissage de la *Up mini* [36]

Densité	<i>High</i>	<i>Medium-high</i>	<i>Medium-low</i>	<i>low</i>
Temps d'impression	67 min	48 min	38 min	35 min
Masse	17.2 g	12 g	9.4 g	8.5 g
Coût	1.72 €	1.2 €	0.94 €	0.85 €

Table 3.2: Comparaisons des différentes densités pour l'impression d'un cube de 30 *mm* de côté

Support

Un autre paramètre à déterminer est l'inclinaison des faces de l'objet à partir de laquelle un matériau de support est nécessaire. Par exemple, définir l'angle à 50° signifie qu'un support est utilisé pour toute surface faisant un angle inférieur à 50° avec l'horizontale. Il faut alors trouver le bon équilibre entre quantité de matériau de support, qualité de la pièce et difficulté à enlever le support. Notons que celui-ci est plus difficile à retirer à l'intérieur des pièces qu'à l'extérieur. De même que pour la pièce en elle-même, l'utilisateur peut choisir la densité utilisée pour le support.

Pour l'impression des différentes pièces, l'inclinaison a été fixée à 30° pour l'utilisation de support. En définissant cet angle à une valeur plus faible, les pièces sont moins bien maintenues et si celles-ci présentent une inclinaison trop importante elles pourraient se décoller plus facilement, voire même s'effondrer. En revanche, en optant pour un angle plus élevé l'imprimante met du support à l'intérieur des pales, dans les trous destinés à accueillir les tiges filetées, qu'il est alors très difficile de retirer.

3.2 Découpeuse laser

Une découpeuse laser est également à disposition au Makilab. Celle-ci permet de découper et/ou graver plusieurs sortes de matériaux tels que du bois, certains plastiques, du carton, etc. mais ne supporte pas les métaux. Cette machine est très simple d'utilisation et offre une exécution rapide, sa présence dans un Fablab est donc légitime.

Dans le cadre de ce travail, la découpeuse sera utilisée afin de découper des plaques de MDF (Medium Density Fiberboard) de 3 et 6 mm d'épaisseur. Le MDF est un panneau constitué de fibres de bois et d'un liant synthétique à base de résine urée-formol. Il possède une densité moyenne ($600\text{kg}/\text{m}^3$) par rapport à celle des panneaux de fibres de bois durs ($1000\text{kg}/\text{m}^3$). Ses avantages sont les suivants:

- Matériau quasiment isotrope
- Texture fine qui le rend facile d'emploi
- Bon marché
- Permet l'utilisation de bois de première éclaircie ¹.

La machine permet de découper des surfaces planes sur une surface de travail de $60 \times 40 \text{ cm}^2$ et le laser a une puissance de 80 W et une précision de 0.01 mm [10]. En fonction du matériau à découper et de son épaisseur, il convient de régler différemment la puissance de la machine ainsi que la vitesse de découpe. Pour le MDF, les différents paramètres sont repris dans la table 3.3 [14].

Épaisseur	Fraction de puissance	Vitesse	Nombre de passes
3 mm	50%	5 mm/s	1
6 mm	90%	2 mm/s	2

Table 3.3: Paramètres de découpe pour du MDF

¹Bois de première éclaircie: arbres de faible diamètre, qui ne peuvent pas être valorisés en bois massif

Chapitre 4

Générateur électrique

La conversion électromécanique est une fonction primordiale des aérogénérateurs. Il est en effet nécessaire de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique si l'on désire l'utiliser directement dans un dispositif électrique ou encore la stocker préalablement dans des batteries. C'est la raison pour laquelle un générateur est connecté à l'arbre de rotation de l'éolienne d'une part et raccordé à un système électrique d'autre part.

Dans un premier temps, afin de conserver l'esprit "*homemade*" pour l'ensemble de l'éolienne, une pré-étude de conception et de dimensionnement a été effectuée pour le générateur.

Cependant, la charge de travail nécessaire aux autres tâches s'étant avérée plus importante que prévue, la fabrication du générateur n'a finalement pas aboutie. Nous avons en effet préféré consacrer d'avantage de temps à l'étude aérodynamique et au dimensionnement mécanique de notre machine. Ces deux étapes étant indispensables à la réalisation du prototype tandis que le générateur pouvait aisément être remplacé par un modèle disponible sur le marché.

Les expérimentations du prototype ont dès lors été effectuées à l'aide d'un moteur du laboratoire. Celui-ci possède des performances élevées, une grande fiabilité ainsi que des données techniques précises et complètes, ce qui constitue un avantage indéniable par rapport à un générateur que nous aurions nous même réalisé.

Ce chapitre s'articule en trois parties principales: le choix du type de générateur que nous souhaitons concevoir, son dimensionnement et enfin la présentation du moteur et des accessoires utilisés lors des essais en soufflerie.

4.1 Configuration

Les générateurs utilisés dans le domaine du petit éolien nécessitent des caractéristiques telles qu'un faible coût, une petite vitesse de rotation, un faible encombrement, une fabrication simple et une vitesse de fonctionnement variable. Les générateurs à aimants permanents et flux axial sont donc bien adaptés pour ce type d'application [28].

L'utilisation d'aimants permanents permet d'obtenir de très bons rendements, simplifie la construction et limite l'usure et les frais d'entretien (par rapport à des machines à balais). Le prix des aimants reste abordable pour des générateurs de faible puissance.

Le choix d'un flux axial propose quant à lui des avantages au niveau de l'encombrement, du refroidissement ainsi que de la densité de puissance.

Les différentes configurations peuvent être classées de la manière suivante [22]:

- Machine simple face
 - à stator avec encoches (figure 4.1(a))
 - à stator sans encoche
 - à stator à pôles saillants
- Machine à double face
 - à stator interne (figure 4.1(b))
 - * à stator avec encoches
 - * à stator sans encoche
 - . avec stator à noyaux de fer
 - . avec stator sans noyau (figure 4.1(d))
 - . avec stator et rotor sans noyau
 - * à stator à pôles saillants
 - à rotor interne (figure 4.1(c))
 - * à stator avec encoches
 - * à stator sans encoche
 - * à stator à pôles saillants
- Machine multidisque

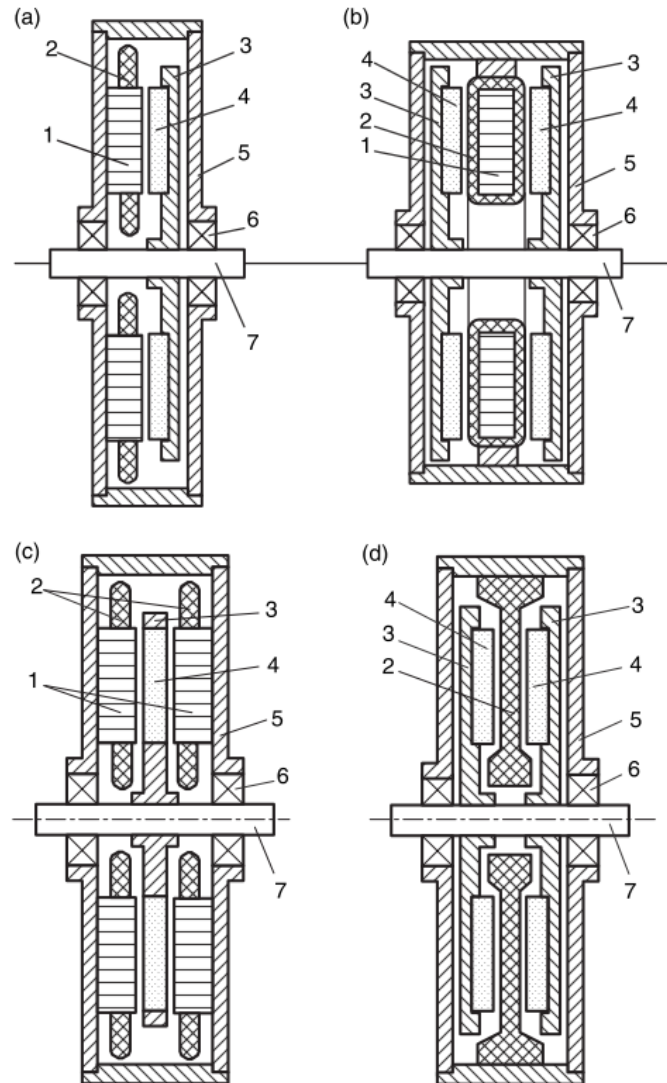


Figure 4.1: Configurations basiques des machines à flux axial et aimants permanents: (a) simple face avec encoches, (b) double face avec encoches à stator interne et deux rotors à aimants permanents, (c) double face à stator avec encoches et rotor interne à aimants permanents, (d) double face sans noyau à stator interne. 1- noyau statorique, 2- bobinage du stator, 3- rotor, 4- aimant permanent, 5- culasse, 6- roulement, 7- arbre [22]

La géométrie retenue pour le générateur est celle présentée sur la figure 4.2. Il s'agit donc d'une machine synchrone à aimants permanents et flux axial, constituée de deux rotors situés de part et d'autre du stator bobiné. Cette disposition permet d'équilibrer les force axiale entre le stator et le rotor.

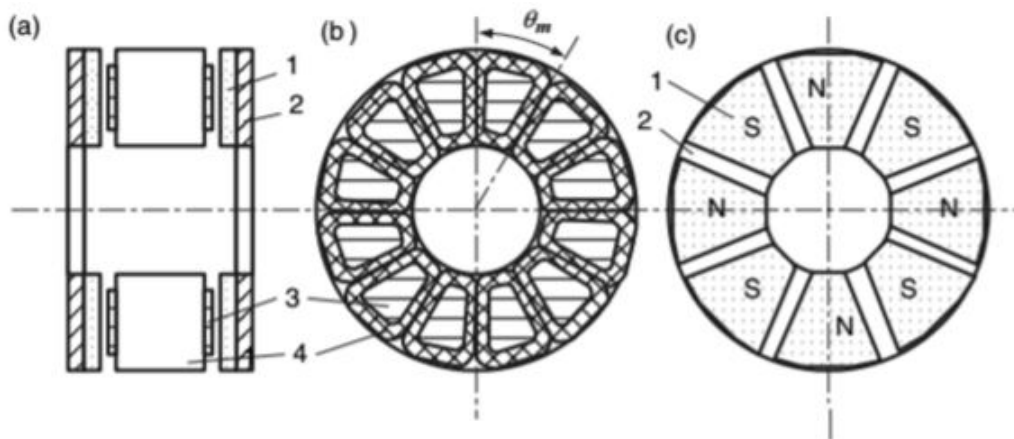


Figure 4.2: Machine à aimants permanents et flux axial à stator interne et double rotor externe (a) vue d'ensemble, (b) stator, (c) rotor, 1- aimants permanents, 2- disque du rotor, 3- pôles du stator, 4- Bobinages [22]

Des aimants permanents en forme de segments annulaires sont disposés de manière à former un réseau de Halbach tel que celui de la figure 4.3. Ce montage ne nécessite pas de disque ferromagnétique et présente un champ magnétique plus important.

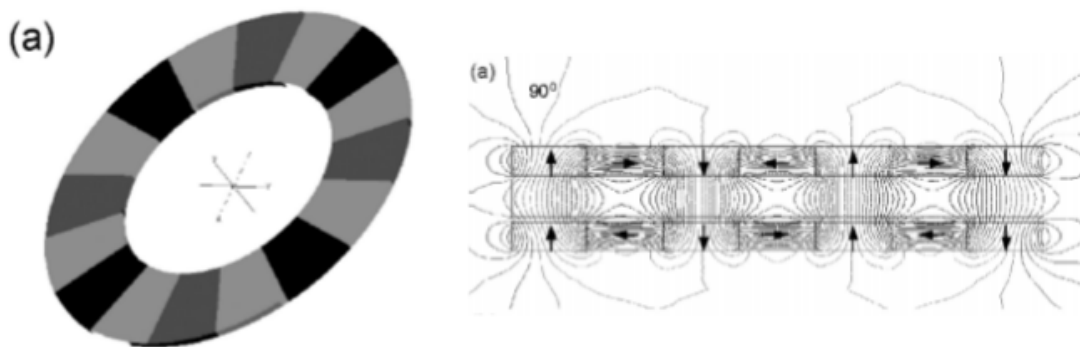


Figure 4.3: Configuration de Halbach [22]

Le stator est quant à lui constitué de bobinages enroulés autour d'un support fabriqué en impression 3D comme présenté sur la figure 4.4.

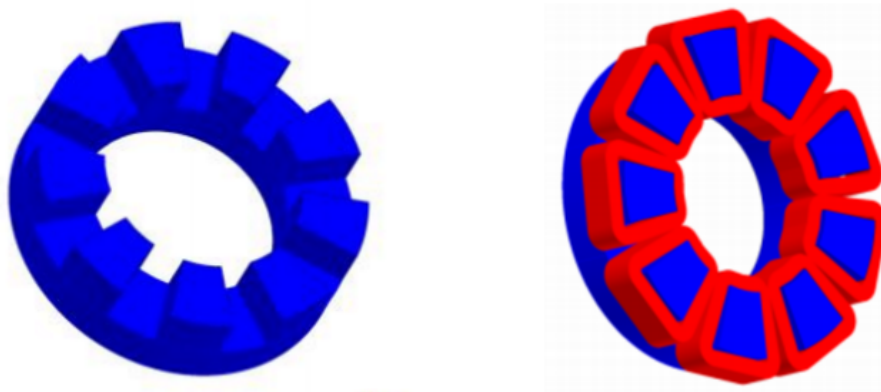


Figure 4.4: Représentation du stator: en bleu le support imprimé en 3D et en rouge le bobinage en fils de cuivre

4.2 Dimensionnement

Pour une machine de faible puissance et dont le fonctionnement est dépendant du vent, il semble raisonnable d'opter pour un montage comprenant une batterie de stockage. Il est alors nécessaire d'être équipé d'un redresseur et d'un onduleur, comme représenté à la figure 4.5.

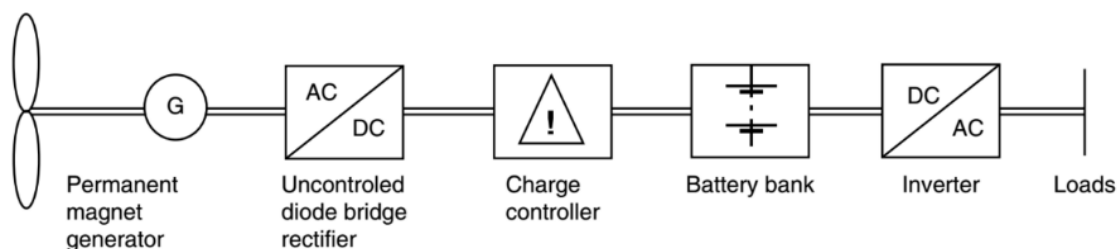


Figure 4.5: Schéma de connexion de l'aérogénérateur à une batterie

Afin de délivrer de la puissance le plus fréquemment possible, il est souhaitable que la force électromotrice au démarrage soit égale à la tension des batteries. Le dimensionnement, basé sur les travaux de Latoufis [25], sera effectué avec comme seule contrainte la tension produite à la vitesse de démarrage.

Le dimensionnement de l'éolienne ainsi que les calculs aérodynamiques ont permis de déduire les paramètres suivants:

$$P = 53 \text{ W}$$

$$\omega_{nom} = 687 \text{ RPM}$$

$$\omega_{cut-in} \simeq 200 \text{ RPM}$$

où les indices *nom* et *cut-in* signifient à vitesse nominal et au démarrage, respectivement.

En tenant compte de la transformation de tension dans le redresseur, on peut déterminer la force électromotrice $E_{f_{cut-in}}$ nécessaire au démarrage:

$$V_{batt} = \sqrt{3} \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{f_{cut-in}} - 1.4 \rightarrow E_{f_{cut-in}} = 11.7[V] \quad (4.1)$$

dans le cas d'une batterie de 24V.

Le rapport des forces électromotrices étant le même que celui des vitesses de rotation, on obtient $\frac{E_{f_{nom}}}{E_{f_{cut-in}}} = \frac{n_{nom}}{n_{cut-in}} \rightarrow E_{f_{nom}} = 40[V]$

4.2.1 Paramètres

Les notations utilisées pour le dimensionnement sont celles reprises sur la figure 4.6. R_{int} et R_{ext} désignent quant à eux les rayons intérieur et extérieur du rotor.

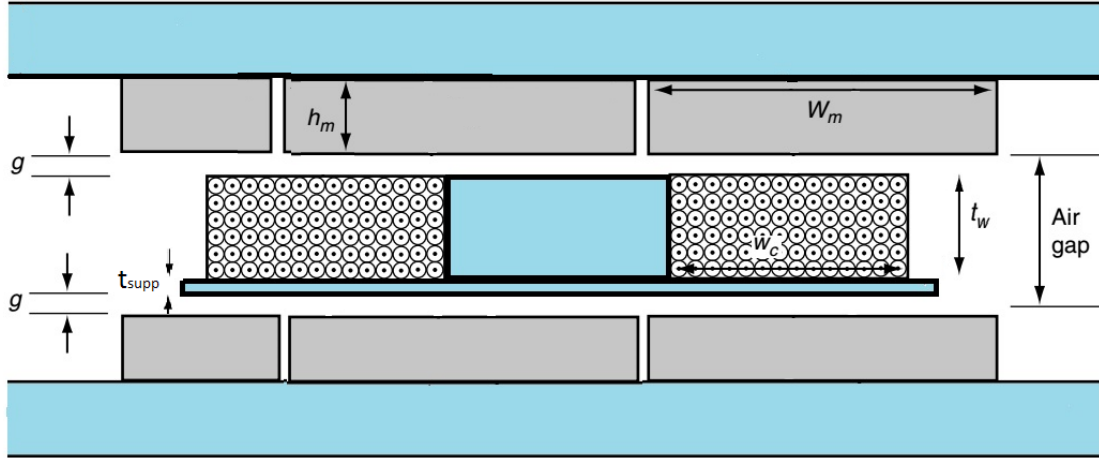


Figure 4.6: Dimensions du générateur

L'objectif du dimensionnement est de limiter le volume d'aimants afin de réduire les coûts de fabrication. Il faut donc effectuer une optimisation suivant plusieurs paramètres :

- le rayon intérieur R_{int}

- le rayon extérieur R_{ext}
- l'épaisseur du bobinage t_w (*winding thickness*)
- l'épaisseur des aimants h_m (*magnet height*)
- la fréquence électrique f_{elec}

Tous ces paramètres sont liés ensemble via diverses équations présentées ci-après.

4.2.1.1 La fréquence électrique

La fréquence électrique est donnée par la formule suivante:

$$f_{elec} = \frac{2p n_{nom}}{120} \quad (4.2)$$

où p est le nombre de paires pôles.

Une fois le nombre de pôles déterminé, le nombre de bobinages sera choisi de manière à maximiser le facteur de bobinage k_w à l'aide du tableau de la figure 4.7.

$\begin{smallmatrix} 2p \\ S \end{smallmatrix}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
3	1/2 .866	1/4 .866		1/8 (.866)	1/10 (.866)		1/14 (.866)	1/16 (.866)		1/20 (.866)	1/22 (.866)	
6		1/2 .866		1/4 (.866)	1/5 (.866)		1/7 (.866)	1/8 (.866)		1/10 (.866)	1/11 (.866)	
9			1/2 .866	3/8 .945	3/10 .945	3/12 (.866)	3/14 (.945)	3/16 (.945)		3/20 (.945)	3/22 (.945)	
12				1/2 .866	2/5 .966		2/7 (.966)	1/4 (.966)		1/5 (.866)	2/11 (.966)	
15					1/2 .866		5/14 .866	5/16 .866		1/4 (.866)	5/22 (.951)	
18						1/2 .866	3/7 .945	3/8 .945		3/10 .945	3/11 (.902)	1/4 (.866)
21							1/2 .866	7/16 .932		7/20 .953	7/22 .953	
24								1/2 .866		2/5 .966	4/11 .957	

Figure 4.7: Combinaisons du nombre de bobines S et de pôles $2p$ pour des machines triphasées à bobinages concentrés équilibrés [20]

4.2.1.2 Flux magnétique

Pour le cas d'un montage en réseau de Halbach composé de deux rotors, la densité de flux magnétique maximale, située à la surface des aimants est exprimée par l'équation (4.3), tandis que la densité normale de flux magnétique entre les deux disques s'exprime selon l'équation (4.4)[22].

$$B_{m0} = B_r [1 - \exp(-\beta h_M)] \frac{\sin(\pi/n_M)}{\pi/n_M} \quad (4.3)$$

$$B_z(x, z) = B_{m0} \sin(\beta x) \frac{1}{\cosh(\beta t/2)} \cosh(\beta z) \quad (4.4)$$

avec:

- B_r la densité de flux magnétique rémanent de l'aimant,
- $\beta = 2\pi/l_a$,
- $l_a = 2\pi \frac{R_{ext}-R_{int}}{p}$ la longueur d'onde du réseau de Halbach (voir figure 4.8),
- n_M le nombre d'aimants permanents par longueur d'onde ($n_M = 4$ dans notre cas),
- x la coordonnée dans la direction tangentielle,
- z la coordonnée dans la direction normale.

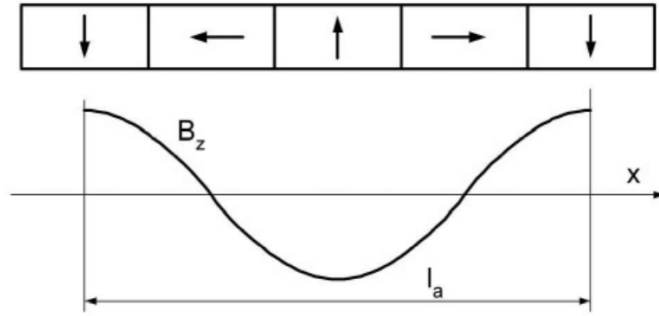


Figure 4.8: Réseau de Halbach cartésien [22]

Le flux magnétique maximum par pôle est obtenu par (4.5).

$$\phi_{max} = \iint_S B \cdot dS \quad (4.5)$$

avec $S_{pole} = (R_{ext}^2 - R_{int}^2) \frac{\pi}{2p}$ la surface d'un pôle (i.e. de deux aimants dans le cas d'un montage de Halbach).

4.2.1.3 Bobinage

Le nombre de tours par bobine N_c est calculé à l'aide de (4.6), où q est le nombre de bobines par phase.

$$N_c = \frac{\sqrt{2}E_f}{qk_w\phi_{max}2\pi f} \quad (4.6)$$

Le courant maximum circulant dans le bobinage est donné par (4.7) dont le facteur 1.1 tient compte d'une surpuissance momentanée de 10%.

$$I_{ACmax} = \frac{1.1P_{nom}}{3E_{fnom}\eta} \quad (4.7)$$

Sur base de ce courant il est possible de calculer la chaleur par unité de longueur, Q , dégagée du bobinage par effet Joule :

$$Q = \frac{P}{l} = \frac{RI^2}{l} \quad (4.8)$$

or,

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{\rho Nl}{S_{fil}} \\ S_{fil} &= \frac{S_{bob}k_{fil}}{N} \end{aligned} \right\} \Rightarrow R = \rho \frac{N^2 l}{S_{bob}k_{fil}} \quad (4.9)$$

avec ρ la résistivité électrique du cuivre et k_{fil} le ratio entre la surface de cuivre et la surface totale d'une section de l'enroulement (pour un enroulement réalisé à la main on considère que $k_{fil} = 0.45$).

Donc (4.8) et (4.9) nous donnent,

$$Q = \rho \frac{(NI)^2}{S_{bob}k_{fil}} = \frac{\rho}{k_{fil}} \frac{(NI)^2}{t_w w_c} \quad (4.10)$$

La conductivité thermique au sein des différents matériaux tels que représenté sur la figure 4.9 permet d'obtenir une seconde expression faisant intervenir la chaleur Q :

$$\Delta T = \left(\sum \frac{h_i}{k_i} \right) \frac{1}{w_c} Q = \left(\sum \frac{h_i}{k_i} \right) \frac{1}{w_c} \frac{\rho}{k_{fil}} \frac{(NI)^2}{t_w w_c} \quad (4.11)$$

L'expression de la largeur de bobinage s'obtient ensuite en transformant l'équation (4.11):

$$w_c = \frac{NI}{\sqrt{\frac{k_{fil} t_w}{\rho}}} \sqrt{\frac{\left(\sum \frac{h_i}{k_i} \right)}{\Delta T}} = \frac{NI}{\sqrt{\frac{c_q k_{fil} t_w}{\rho}}} \quad (4.12)$$

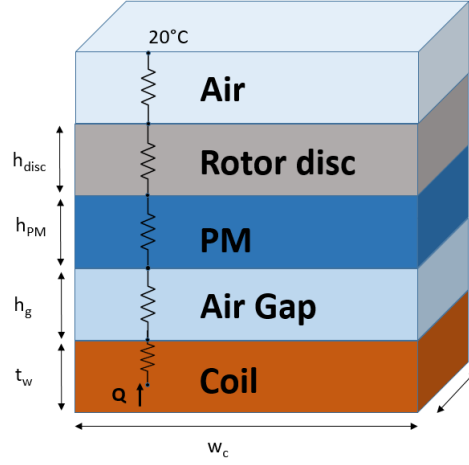


Figure 4.9: Représentation des différentes résistances thermiques

dont le facteur c_q représente un coefficient de chaleur approximé par une valeur de $3000[W/m^2]^1$ [25]).

Connaissant la surface de la section de bobinage ($w_c \times t_w$), le coefficient de remplissage (k_{fil}) et le nombre de tours dans une bobine, il est possible de déterminer la section d'un fil de cuivre s_c et son diamètre d_c :

$$s_c = \frac{k_f w_c t_w}{N_c} \quad (4.14)$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4s_c}{\pi}} \quad (4.15)$$

4.2.2 Contraintes

Après avoir fixé les variables d'optimisation ainsi que les équations les liant entre elles, il est nécessaire de prendre en compte certaines contraintes.

¹Une vérification des dimensions du coefficient est effectuée:

$$\left(\frac{(\sum \frac{h_i}{k_i})}{\Delta T} \right)^{-1} = \frac{[K]}{\frac{[m]}{[W/(mK)]}} = [W/m^2] \quad (4.13)$$

La première contrainte est la suivante:

$$C1 : \frac{2\pi}{Q} R_{int} > 2w_c \times 1.2 \quad (4.16)$$

Celle-ci permet de s'assurer que le double de la largeur de bobinage w_c soit inférieur à la place disponible pour la bobine complète au niveau du rayon intérieur (voir figure 4.10). Un coefficient de 1.2 est ajouté afin de faciliter la réalisation la bobine.

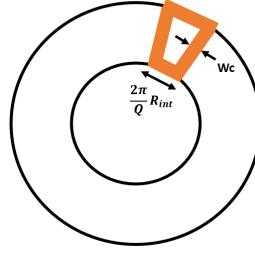


Figure 4.10: Représentation d'un bobinage

La deuxième contrainte est:

$$C2 : \frac{2\pi}{2p} R_{int} > 2g + t_w + t_{supp} \quad (4.17)$$

Elle impose que la largeur des aimants au niveau du rayon intérieur w_m soit supérieure à l'*air gap* total (voir figure 4.6). Cela évite ainsi de tendre vers un nombre de pôles démesuré.

4.2.3 Résultats

Le calcul d'optimisation est effectué à l'aide de la fonction *fmincon* de *MATLAB* qui fournit les valeurs suivantes:

- le rayon intérieur $R_{int} = 43 \text{ mm}$
- le rayon extérieur $R_{ext} = 55 \text{ mm}$
- l'épaisseur des aimants $h_m = 5 \text{ mm}$
- l'épaisseur du bobinage $t_w = 2.7 \text{ mm}$
- la largeur de bobinage $w_c = 1.2 \text{ mm}$
- le diamètre du fil $d_c = 0.18 \text{ mm}$

- le nombre de tours par bobine $N_c = 550$
- la fréquence électrique $f_{elec} = 50 \text{ Hz}$
- le nombre de pôles $2p = 10$
- le nombre de bobinages $S = 9$

4.3 Générateur utilisé

Nous avons finalement pris la décision d'effectuer les tests avec un moteur disponible au laboratoire, utilisé dans notre cas comme générateur.

Il s'agit d'un moteur à hautes performances fabriqué par la marque suisse Maxon. Celui-ci est équipé de deux modules complémentaires: un réducteur planétaire et un encodeur.

Le moteur est un Maxon EC40 sans balai triphasé à une paire de pôles. Son principe de fonctionnement est identique à celui d'un moteur à courant continu pour lequel le collecteur à balais est remplacé par un commutateur électronique. Les aimants permanents en néodyme sont fixés sur le rotor tandis que les bobinages sont disposés sur le stator.

Le réducteur est quant à lui à engrenages planétaires.

Ces deux dispositifs sont représentés sur la figure 4.11.

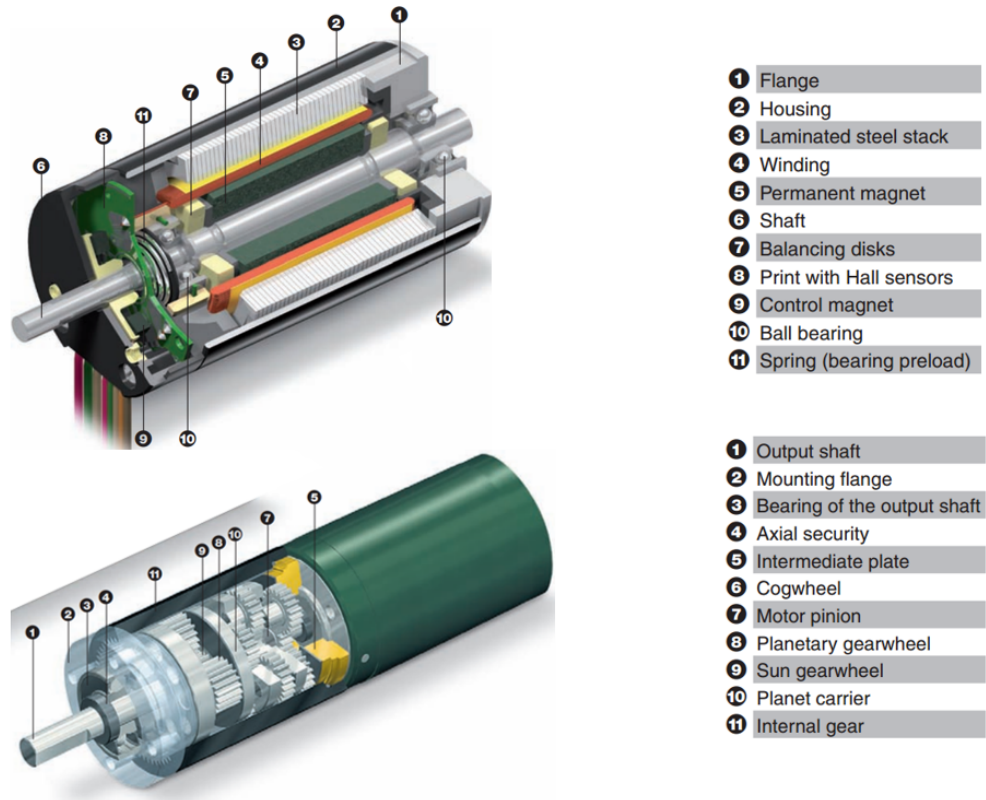


Figure 4.11: Représentation du générateur et du réducteur [27]

Les principales caractéristiques issues des datasheets [27] de ces deux composants sont reprises dans la table 4.1.

Moteur Maxon EC40			
Puissance nominale	[W]	P_{nom}	120
Tension nominale	[V]	U_{nom}	42
Courant nominal	[A]	I_{nom}	3.4
Vitesse de rotation nominale	[RPM]	ω_{nom}	9290
Couple nominal	[Nm]	T_{nom}	0.122
Courant à vide	[A]	I_v	3.4
Vitesse de rotation à vide	[RPM]	ω_v	10400
Rendement maximum	[%]	η_{gen}	84
Constante de couple	[mNm/A]	k_T	38.2
Constante de vitesse	[rpm/V]	k_ω	250
Résistance de phase	[Ω]	R_{ph}	0.625
Nombre de phases	[—]	n_ϕ	3
Nombre de paires de pôles	[—]	p	1
Réducteur GP42 C			
Rapport de réduction	[—]	k_r	49 : 4
Rendement maximum	[%]	η_r	81

Table 4.1: Caractéristiques principales du générateur et de son réducteur

Chapitre 5

Résultats expérimentaux

Une fois les études théoriques, la conception et la fabrication du prototype effectuées, nous avons réalisé des essais en laboratoire afin de valider le bon fonctionnement de l'éolienne. L'objectif principal de ces tests consistait en la comparaison du comportement prédit en théorie avec les résultats expérimentaux.

Ces expérimentations ont été réalisées dans la soufflerie mise à notre disposition dans le hall LEFT de l'UCL. Celle-ci permet d'imposer des vitesses de vents différentes pour ensuite mesurer la puissance électrique produite. Nous avons également utilisé un système de régulation afin d'étudier l'influence de la vitesse de rotation sur les performances. Sur base de ces différentes données, il était alors possible de retracer la courbe caractéristique de l'éolienne présentant le coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique.

Dans la suite du rapport nous présentons successivement la soufflerie, le matériel utilisé pour les mesures électriques et la régulation et finalement les résultats obtenus.

5.1 Soufflerie

La soufflerie utilisée lors des tests est constituée d'une hélice à 6 pales entraînée par un moteur électrique et d'une conduite cylindrique de 1 *m* de diamètre. Ce modèle de soufflerie présente plusieurs inconvénients:

1. Elle fonctionne en circuit aérodynamique ouvert, ce qui présente le désavantage d'avoir un niveau de turbulence plus élevé que dans le cas d'un circuit fermé (soufflerie à retour).

2. Malgré la présence d'un lisseur, l'effet de tourbillon dû à l'hélice n'est pas tout à fait atténué.
3. La vitesse est nulle à la paroi.

Les différents phénomènes explicités ci-dessus induisent un profil de vitesse instable et non uniforme sur la section. C'est pourquoi la vitesse du vent est moyennée à l'aide de la règle de log-Tchebycheff. Cette dernière consiste à mesurer la vitesse aux différents points repris sur la figure 5.1 et ensuite d'effectuer la moyenne. L'ensemble de ces mesures, dont la dispersion est relativement élevée, sont reprises dans l'annexe A.

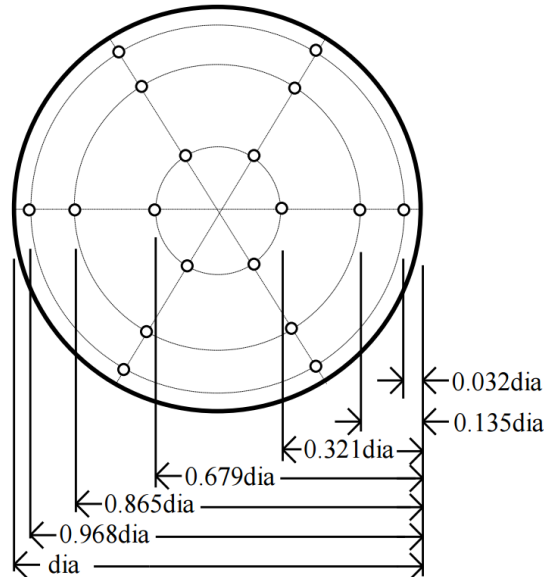


Figure 5.1: Positions des différents points de mesures pour la méthode log-Tchebycheff

Le flux d'air en sortie de la soufflerie subit une distorsion autour de l'éolienne. Dans le cas d'une veine d'essais ouverte (qui correspond à la soufflerie utilisée) la vitesse au niveau des pales est inférieure au cas d'une veine de fluide infinie. Au contraire, une veine d'essais fermée engendrerait des vitesses supérieures. Ce phénomène, représenté sur la figure 5.2 est appelé blocage et est d'autant plus important que le ratio de la surface de la pièce testée sur la surface de la veine est grand. Au delà d'un ratio de 10 % cet effet n'est plus négligeable. Dans notre cas ce ratio vaut environ 20 % et le blocage devrait donc être pris

en compte. Cependant il faudrait réaliser des études plus approfondies en vue de déterminer des coefficients de correction appropriés.

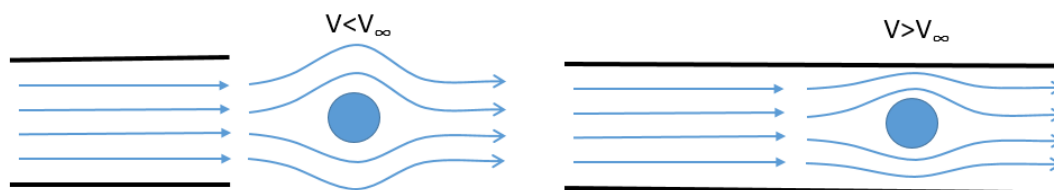


Figure 5.2: Représentation du phénomène de blocage: à gauche le cas d'une veine d'essais ouverte et à droite celui d'une veine d'essais fermée

La vitesse de vent à la sortie de la soufflerie est réglable par variation de la fréquence électrique du moteur entrainant l'hélice. La table 5.1 fournit les relations entre la fréquence et la vitesse du vent mesurée à l'aide d'un anémomètre thermique à fil chaud. L'ensemble des mesures est disponible dans l'annexe A.

Fréquence électrique $[Hz]$	20	25	30	35	40	45	50
Vitesse du vent $[m/s]$	4.15	5.21	6.45	7.57	8.43	9.32	10.3

Table 5.1: Fréquences et vitesses de vent correspondantes

5.2 Installation électrique

L'ensemble du matériel électrique utilisé pour effectuer les tests est représenté sur la figure 5.3. Les différents appareils sont détaillés un par un dans la suite de ce rapport.

5.2.1 Redresseur

Le redresseur a pour fonction de transformer la tension alternative triphasée produite par le générateur en une tension continue. Celui utilisé au laboratoire est un redresseur double alternance triphasé non commandé dont le schéma électrique est représenté sur la figure 5.4(a) Ce montage est également appelé pont de Graëtz triphasé à diodes.

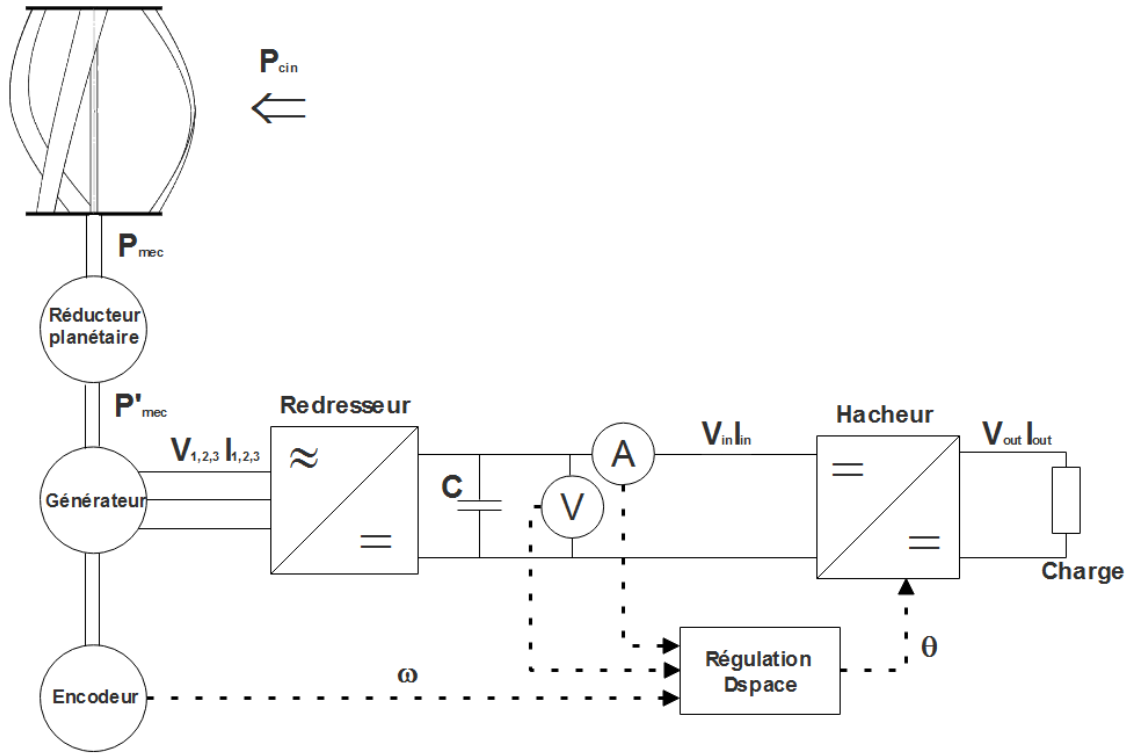


Figure 5.3: Représentation schématique de l'installation électrique utilisée au laboratoire.

La tension de sortie idéale tracée sur la figure 5.4(b) est donnée par la formule suivante :

$$V_{out} = \frac{3V_{crete}}{\pi} \quad (5.1)$$

Un condensateur est placé en parallèle à la sortie du redresseur afin de lisser le signal. Ce dernier se charge lorsque la tension augmente et amortit la diminution de tension en se déchargeant. Son effet est représenté sur la figure 5.5.

5.2.2 Hacheur

Le hacheur, ou convertisseur boost, illustré sur la figure 5.6 est une alimentation à découpage qui transforme une tension DC en une autre tension DC de valeur supérieure. L'interrupteur, commandé par un signal carré haute fréquence, permet au système de se trouver dans deux états distincts:

1. Une phase d'accumulation d'énergie dans la self lorsque l'interrupteur est fermé et donc la charge déconnectée de l'alimentation.

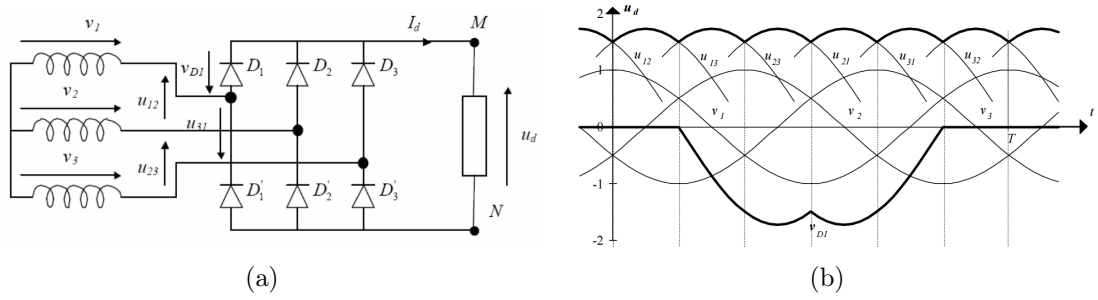


Figure 5.4: Montage d'un redresseur triphasé double alternance à diodes (a) et graphe de l'évolution des tensions dans le redresseur (b)

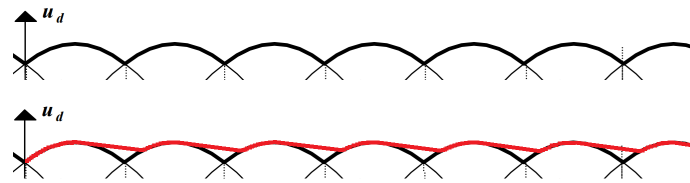


Figure 5.5: Tension de sortie sans et avec condensateur (courbe rouge)

2. Une phase de transfert d'énergie de la self vers le condensateur lorsque l'interrupteur est ouvert.

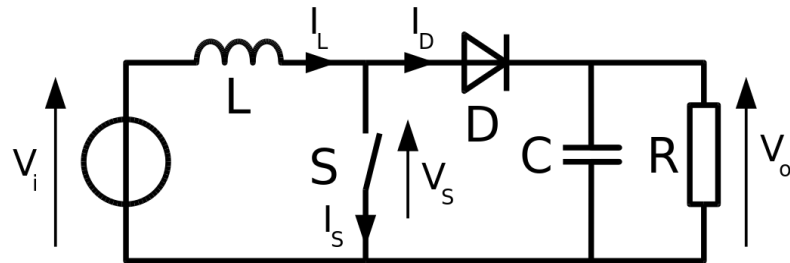


Figure 5.6: Schéma électrique d'un convertisseur boost

Si la capacité du condensateur est suffisamment élevée, la tension de sortie sera constante et donnée par l'équation (5.2) avec le rapport cyclique θ^1 compris entre 0 et 1. Le facteur k est donc toujours supérieur à l'unité.

¹Fraction de la période de commutation lors de laquelle le signal carré est non nul. C'est donc le pourcentage du temps durant lequel l'interrupteur est fermé.

$$V_o = \frac{V_i}{1 - \theta} = kV_i \quad (5.2)$$

En négligeant les pertes, la puissance à l'entrée doit être la même que celle à la sortie. Cela permet d'écrire l'équation suivante:

$$P_o = P_i \Rightarrow V_o I_o = V_i I_i \Rightarrow I_o = \frac{I_i}{k} \quad (5.3)$$

Les équations (5.2) et (5.3) permettent ensuite d'écrire la relation entre la résistance d'entrée et celle de sortie:

$$R_o = \frac{V_o}{I_o} = \frac{kV_i}{\frac{I_i}{k}} = k^2 R_i \quad (5.4)$$

Ces différentes grandeurs électriques ont une influence directe sur le fonctionnement du générateur et donc de l'éolienne.

Le générateur utilisé est caractérisé par une constante de couple et une constante de vitesse définies par les équations suivantes:

$$k_T = \frac{\tau_{EM}}{I} \quad (5.5)$$

$$k_\omega = \frac{\omega}{V} \quad (5.6)$$

avec τ_{EM} le couple électromagnétique, I le courant dans les bobinages, ω la vitesse de rotation et V la tension aux bornes des bobinages.

La résistance de sortie R_o est fixée par la charge connectée, ce qui signifie que la résistance d'entrée dépend uniquement du rapport cyclique. Si ce rapport est modifié, les courants I_i et I seront modifiés à leur tour. Le couple résistif du générateur subira donc une variation. C'est sur ce principe que repose le système de régulation de la vitesse de rotation. En effet cette dernière varie selon l'équation (5.7):

$$J \frac{d\omega}{dt} = Q - \tau_{EM} \quad (5.7)$$

avec J le moment d'inertie et Q le couple mécanique produit par l'éolienne.

En conclusion, une augmentation du rapport cyclique entraîne une diminution de la résistance d'entrée, une augmentation du courant de bobinage et du couple électromagnétique et donc une chute de la vitesse de rotation de l'éolienne. Le phénomène inverse se produit lorsque l'on diminue le rapport cyclique.

5.2.3 *dSPACE/Simulink*

Pour effectuer une régulation du système, il est indispensable de pouvoir mesurer en temps réel différentes variables pour ensuite modifier certains paramètres. *dSPACE* fournit des interfaces d'acquisition de données nécessaires à cette régulation. L'ensemble des calculs est effectué à l'aide de modèles *Simulink* connectés à des ports d'entrées/sorties compatibles avec la carte *dSPACE* qui exécute l'asservissement.

Les variables mesurées sont la vitesse de rotation ainsi que la tension et le courant à la sortie du redresseur. Cela nous permet de déterminer la puissance produite et, en connaissant la vitesse du vent, le coefficient de puissance C_p et la vitesse spécifique.

Il est dès lors possible de retracer les courbes caractéristiques de l'éolienne en déterminant ces valeurs pour différents points de fonctionnement.

Dans un deuxième temps il sera également possible de réguler l'éolienne à l'aide d'un algorithme de contrôle. La régulation la plus intéressante consiste à faire travailler l'éolienne à son maximum de puissance pour toute vitesse de vent. Ce principe est appelé le Maximum Power Point Tracking¹.

¹MPPT en abrégé.

5.3 Résultats

Le premier test effectué au laboratoire consistait simplement à positionner l'éolienne dans la veine de vent et à mesurer l'évolution de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse de vent imposée. Ces résultats sont disponibles sur la figure 5.7.

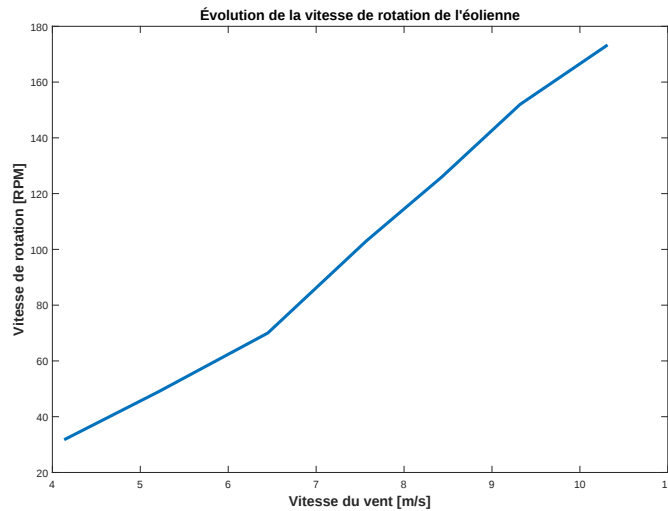


Figure 5.7: Vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent

Force est de constater que les vitesses de rotation sont bien trop faibles par rapports aux résultats attendus. La vitesse maximum atteinte est de 173 *RPM* pour une vitesse de vent de 10.3 [m/s]. Ce qui correspond à une vitesse spécifique de 0.43. À de telles vitesses la puissance produite est négligeable et les valeurs électriques sont difficilement mesurables. De plus, ce test est effectué sans accoupler le moteur, les pertes par frottements internes au moteur ne sont donc pas encore prises en compte.

Le problème d'auto-démarrage est courant pour les éoliennes de type Darrieus. En effet, pour de faibles vitesses de rotation, les pales sont en décrochage et les forces de portance sont insuffisantes. Ce sont les forces de traînée qui permettent à l'éolienne de démarrer mais pas d'atteindre des vitesses de rotation suffisamment élevées.

En théorie, si la vitesse de rotation maximisant le couple est atteinte, l'éolienne devrait se stabiliser à un point de fonctionnement donné. Cette vitesse se situe aux environs de 670 *RPM* (voir figure 5.8)

Deux solutions ont été envisagées pour atteindre cette vitesse:

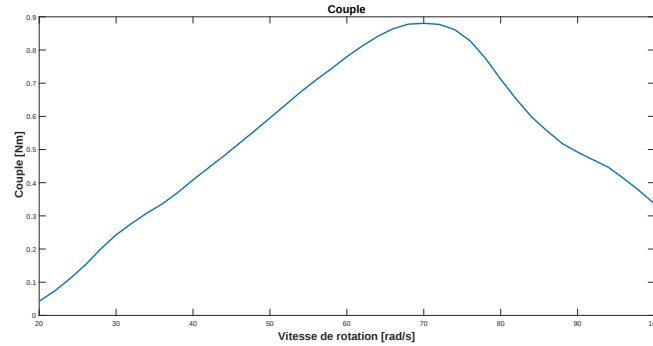


Figure 5.8: Couple théorique en fonction de la vitesse de rotation pour un vent de 10 m/s

1. Rajouter une Savonius afin de constituer une éolienne hybride. La partie Savonius permettrait d'amener le système jusqu'à une vitesse de rotation suffisante à partir de laquelle la Darrieus pourrait produire de la portance et fonctionner correctement.

Le dimensionnement de la Savonius peut être effectué sur base de la vitesse de rotation visée (670 *RPM*), de la vitesse spécifique théorique ($\simeq 0.7$) et de la vitesse de vent (10 *m/s*). Le rayon est alors donné par:

$$R = \frac{\lambda V_{\infty}}{\omega} \simeq 10 \text{ cm} \quad (5.8)$$

Cependant, la hauteur étant limité à 60 *cm* le couple produit est extrêmement faible et donc insuffisant pour entraîner la machine à la vitesse souhaitée.

2. Utiliser un lanceur manuel. Une corde est enroulée autour de l'axe et ensuite tirée afin de mettre l'éolienne en rotation. L'utilisation d'une poulie a permis d'atteindre des vitesses supérieures à 1000 *RPM*. Malgré cette vitesse élevée l'éolienne ne parvient pas à maintenir sa vitesse, elle décélère jusqu'aux vitesses de la figure 5.7.

5.3.1 Analyse des couples

Dans le but d'identifier l'origine du problème, il est nécessaire de déterminer si le couple produit par l'éolienne est insuffisant par rapport aux prédictions ou si les

couples parasites de frottement sont trop importants.

Cette analyse peut être effectuée sur base des mesures de la décélération de l'éolienne et de la formule de l'équation (5.9) pour laquelle les moments d'inertie sont obtenus à l'aide du logiciel de CAO 3D *Solidworks*.

$$J \frac{d\omega}{dt} = Q - Q_r \quad (5.9)$$

avec Q_r le couple résistant.

La figure 5.9 montre les mesures de vitesse de rotations effectuées au laboratoire pour l'éolienne complète ainsi que pour l'éolienne sans les pales pour différentes vitesses de vent. La vitesse augmente jusqu'à atteindre un maximum dans la partie gauche de la courbe qui correspond au lancement manuel. Elle décroît ensuite pour se stabiliser à une vitesse très faible ou nulle.

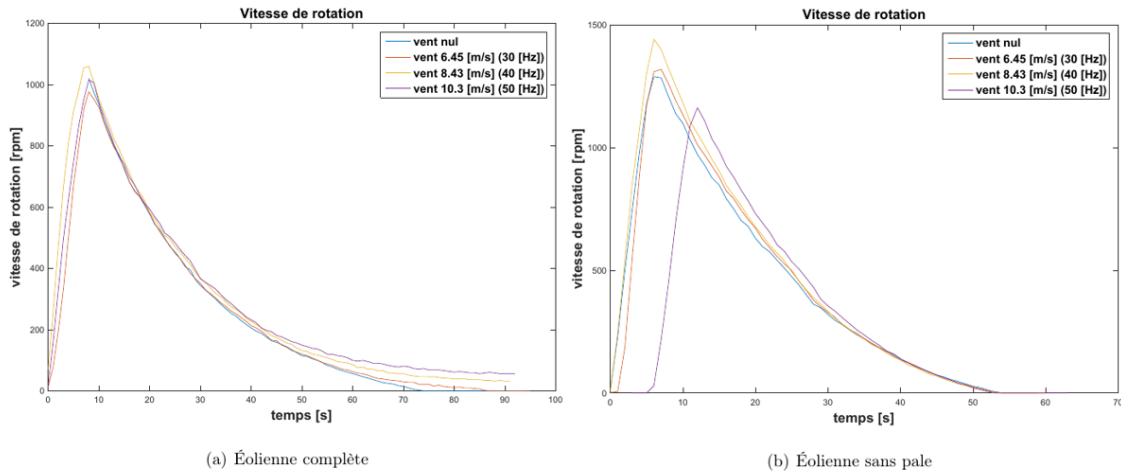


Figure 5.9: Vitesse de rotation du rotor en fonction du temps pour différentes vitesses de vent

La dérivation de cette vitesse de rotation et sa multiplication par le moment d'inertie permet ensuite de déduire les valeurs de couples présentées sur la figure 5.10.

On y constate que le couple résistant de la structure sans pale n'est pas anormalement élevé. Ce qui ne justifie donc pas le dysfonctionnement de l'éolienne. Le couple produit par les pales correspond à la différence entre la courbe rouge et la courbe jaune. On constate que l'effet des pales est positif mais beaucoup trop

faible par rapport à la théorie et insuffisant pour atteindre les vitesses de rotation escomptées.

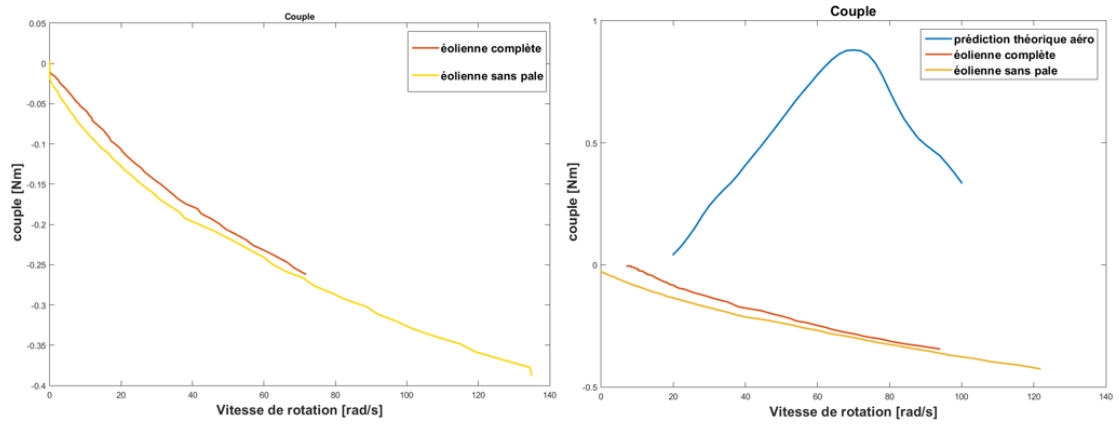


Figure 5.10: Couples en fonction de la vitesse de rotation pour un vent nul à gauche et un vent de 10 [m/s] à droite

5.3.2 Prise en compte de la cambrure virtuelle

Afin de justifier le comportement inattendu de l'éolienne en soufflerie, nous avons étudié l'influence de l'effet de courbure dans l'étude aérodynamique théorique. Étant donné que l'écoulement est en rotation, le profil rencontre une vitesse relative et un angle d'attaque perturbés sur tout le long de la corde. Ceci est appelé effet de courbure et est modélisé par une cambrure virtuelle. La figure 5.11 montre un profil symétrique en mouvement dans un écoulement en rotation. Celui-ci possède les mêmes caractéristiques aérodynamiques que le profil cambré en mouvement dans un écoulement rectiligne et ayant un angle d'attaque virtuel.

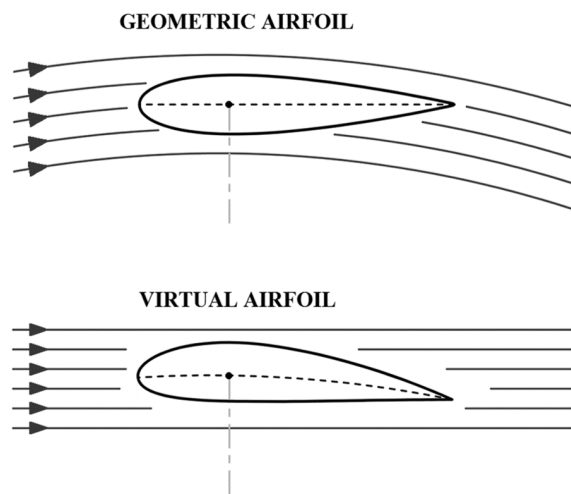


Figure 5.11: Cambrure virtuelle résultante d'un écoulement en rotation

L'effet de courbure est d'autant plus important que le rapport corde sur rayon est élevé. Dans le cas du rotor étudié à forte solidité ces effets doivent donc avoir une grande influence et en particulier aux extrémités de pales où ce rapport est considérable.

L'angle d'attaque local formé par la vitesse relative apparente et la corde du profil varie en fonction de la position sur le profil. Cet angle d'attaque modifié implique une déviation de la force de portance.

Dans sa thèse, Beaudet [18] a repris une théorie développée par Hirsch et Mandel ainsi que Mandel et Burton permettant d'étudier l'influence de l'effet de courbure. Celle-ci consiste à introduire une correction sur l'angle d'attaque $\Delta\alpha_c$ à partir duquel

les coefficients de portance et de traînée sont calculés:

$$\begin{cases} C_L = f(\alpha + \Delta\alpha_c, Re) \\ C_D = g(\alpha + \Delta\alpha_c, Re) \end{cases} \quad (5.10)$$

L'angle correctif se détermine au moyen de la différence d'angle d'attaque entre le bord d'attaque et le bord de fuite:

$$\Delta\alpha_c = \tan^{-1} \left(\frac{1 - \cos(\beta/2)}{\sin(\beta/2)} \right) \quad (5.11)$$

où $\beta = \alpha(0) - \alpha(c)$, 0 et c faisant référence au bord d'attaque et au bord de fuite respectivement, qu'il faut donc déterminer.

L'angle d'attaque, comme il est calculé dans le chapitre 1, correspond à l'angle d'attaque au quart de corde. Afin d'obtenir l'angle d'attaque à une autre position x de la corde, il faut tout d'abord déterminer le décalage azimutal de cette position. Celui-ci s'obtient par la relation suivante:

$$\Delta\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{x_{1/4} - x}{R} \right) \quad (5.12)$$

où $x_{1/4}$ correspond à la position au quart de corde. x est défini positif vers le bord de fuite, comme indiqué sur la figure 5.12. $\Delta\theta_x$ sera dès lors positif pour une position située entre le bord d'attaque et le quart de corde, et négatif après le quart de corde.

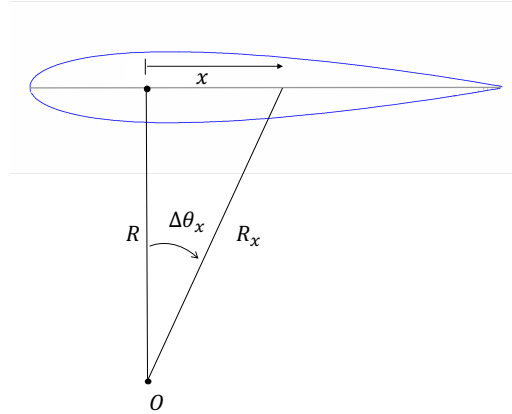


Figure 5.12: Convention pour le décalage azimutal

La distance R_x entre l'axe de rotation et le point considéré sur la corde est également différente de R . Elle se calcule via la formule suivante:

$$R_x = \frac{R}{\cos(\Delta\theta_x)} \quad (5.13)$$

Les formules (5.12) et (5.13) permettent de calculer l'angle d'attaque vu par une position x sur la pale:

$$\alpha_x = \Delta\theta_x - \tan^{-1} \left(\frac{-U \cos(\psi + \Delta\theta_x) \cos \delta}{U \sin(\psi + \Delta\theta_x) + \omega R_x} \right) \quad (5.14)$$

En appliquant l'équation (5.14) au bord d'attaque ainsi qu'au borde de fuite, il est possible de déterminer l'angle correctif à appliquer sur les coefficients de portance et traînée via l'équation (5.10).

En tenant compte de l'effet de courbure grâce à l'angle correctif, le coefficient de portance est fortement réduit, passant d'une valeur maximale de 0.27 à 0.18. Les courbes de C_p pour les cas avec et sans effet de courbure sont données sur la figure 5.13.

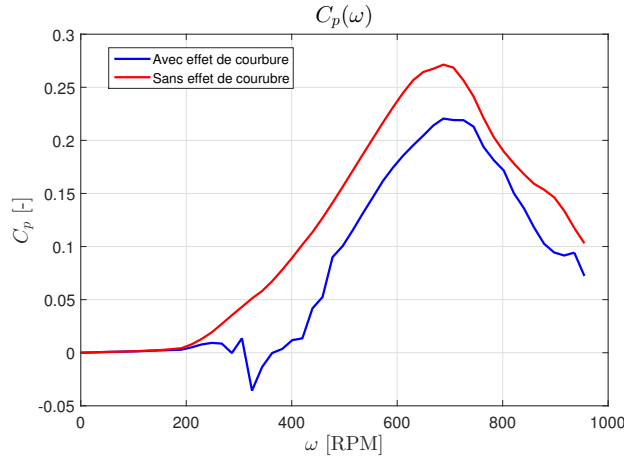


Figure 5.13: Influence de l'effet de courbure sur le coefficient de puissance

L'effet de cambrure a donc une influence non négligeable sur le coefficient de puissance de l'éolienne mais ne permet toutefois pas de justifier les résultats expérimentaux.

Une autre piste d'explication serait le mauvais calage des pales qui fausserait ainsi l'angle d'attaque et modifierait les performances. Cependant des mesures,

bien qu'approximatives, de l'angle de calage des pales n'a pas révélé de différence considérable par rapport aux plans.

Chapitre 6

Étude commerciale

Ce chapitre porte sur les aspects de commercialisation de la technologie et a été réalisé en collaboration avec la compagnie Innovus, attachée à la Stellenbosch University, en Afrique du Sud. Innovus est une compagnie d'innovation faisant la connection entre l'université et le monde de l'industrie. Elle est responsable du transfert de technologie, du support et développement entrepreneurial ainsi que de l'innovation à l'université. Innovus gère la commercialisation de projets innovants de l'université ainsi que la propriété intellectuelle, au travers de brevets, licences et formations de start-up. Nous avons eu la chance de pouvoir nous rendre sur place et de travailler avec eux grâce au cours des classes d'innovation et à la chair Lhoist-Berghmans.

Cette étude a été réalisée pour le dispositif complet de l'éolienne en considérant le générateur dimensionné dans le chapitre 4.

6.1 Business model

L'objectif principal de cette étude a été de réaliser un business model, c'est à dire un plan reprenant tous les facteurs clés nécessaires à la commercialisation de ce projet. Il a donc été essentiel d'identifier tous les éventuels intervenants, en allant des clients jusqu'aux partenaires industriels.

Dans cette approche il faut tout d'abord identifier les besoins, ensuite la clientèle et finalement la solution. Il faut donc répondre aux questions: **pourquoi** ? pour **qui** ? et **comment** ?. Ce type de modèle a été développé par Alexander Osterwalder, un Suisse spécialisé dans la modélisation d'entreprise et connu pour ce *business model canvas* [4].

Le business model réalisé pour ce projet se trouve en annexe C et est développé de manière plus précise ci-après.

Segments de clientèle

Cette section reprend une liste non-exhaustive des clients susceptibles d'acheter la technologie et de la raison pour laquelle ils seraient intéressés.

D'une part, les éventuels clients pourraient être les personnes n'ayant pas accès au réseau électrique.

- Communautés vivant dans des régions n'ayant pas d'accès à l'électricité, qui ont besoin d'une petite quantité d'électricité et à coût minimal
- Marins qui voudraient avoir de l'électricité à bas coût en mer
- Propriétaires de campings préférant ne pas relier chaque emplacement au réseau et voulant permettre aux locataires de bénéficier d'énergie verte
- Familles nomades, qui pourraient se procurer leur propre électricité et en s'installant où ils veulent

D'autre part, des clients potentiels pourraient être des personnes soucieuses de l'environnement et vivant en milieu urbain, en appartement par exemple, qui aimeraient pouvoir produire leur propre électricité en disposant d'un espace minime: toit trop petit pour poser des panneaux solaires par exemple

Un dernier client pourrait être une entreprise fabriquant des éoliennes, qui s'occuperait d'acheter cette technologie et de la revendre par elle-même à des particuliers

Proposition de valeur

Cette section décrit la technologie mise en place pour répondre aux besoins des clients identifiés dans la section précédente.

- Éolienne fabriquée au moyen d'impression 3D et de composants standards, permettant de charger un téléphone ou une batterie de 24V sans devoir être connectée au réseau
- Plans et manuels de construction d'une éolienne fabriquable par impression 3D, permettant de charger un téléphone ou une batterie de 24V sans devoir être connectée au réseau

Cette proposition est faite pour les personnes désireuses d'imprimer et de construire elles-mêmes le dispositif.

Liens

Ici sont identifiés les moyens utilisés pour relier les *segments de clientèle* avec les *propositions de valeur*.

- Site internet sur lequel il est possible de commander le dispositif pour se le faire livrer à domicile ou alors de télécharger les plans pour fabriquer l'éolienne soi-même
- Plateforme sur laquelle seraient référencés tous les fablab et propriétaires d'imprimante 3D ayant donné leur accord de manière à ce que chacun puisse trouver l'imprimante la plus proche, pour pouvoir la louer et imprimer les morceaux de l'éolienne. Il s'agirait d'une sorte de Airbnb pour imprimantes 3D. De cette manière, même les personnes n'ayant pas d'imprimante pourraient fabriquer une éolienne en utilisant l'imprimante la plus proche de chez eux.

Relation avec la clientèle

Il s'agit de la relation qui sera établie entre les clients et l'entreprise.

- Service de maintenance, joignable via un formulaire de réclamation électronique à remplir sur le site internet.

Étant donné que l'idée générale est de fournir un système de production d'électricité à coût minimum, l'entreprise ne pourrait pas se permettre de fournir un service après-vente joignable par téléphone 24h/24 et 7j/7. La solution d'un formulaire via le site web a donc été identifiée comme la moins coûteuse.

Flux de revenus

Cette section détaille la source de revenus de l'entreprise.

- Vente du dispositif assemblé + service de livraison
- Vente des fichiers STL et du manuel
- Cotisation mensuelle donnant accès au service après-vente

La cotisation permettrait à l'entreprise d'une part de continuer à rentrer de l'argent périodiquement mais également de proposer un prix plus faible pour le dispositif seul, le rendant encore plus abordable.

Partenaires clés

Sont exposés ici les différents partenaires et fournisseurs nécessaires pour mener à bien la commercialisation de cette technologie.

- Facebook, google et autres sites internet permettant de mettre des publicités
- Un service de livraison international
- Une entreprise fournissant des batteries
- Les universités étant donné qu'à l'heure actuelle un grand nombre d'entre elles possède des imprimantes 3D, fablab
- Les propriétaires d'imprimantes 3D, particuliers ou non, qui sont sur la plateforme mise en place pour créer un réseau d'imprimantes 3D à travers le monde

Activités clés

Les activités clés sont les étapes qu'il faut encore développer avant de pouvoir commencer la commercialisation. Il faut reprendre toutes les activités que nécessitent les sections précédentes.

- Créer un site internet
- Créer une plateforme pour faire un réseau d'imprimantes 3D
- Déposer un éventuel brevet
- Développer une image de marque
- Réaliser un manuel d'assemblage

Ressources clés

Il s'agit de toutes les ressources qui font que ce projet pourrait être une réussite.

- Position géographique: centre de l'Europe
- Site internet
- Design innovant
- Équipe d'ingénieurs

Structure de coût

Les coûts se divisent en deux catégories: les coûts fixes et les coûts liés uniquement à la construction d'une éolienne.

Coûts fixes

- Salaire des employés
- Site internet
- Imprimante 3D/découpeuse laser
- Administration
- Bureaux et hangar pour la construction et le stockage

Coûts liés à la construction d'un dispositif

- Matériaux pour la construction de deux prototypes (prise en compte des rebuts)
- Coûts de la livraison

6.2 Évaluation

Après avoir réalisé le business model, une évaluation a été nécessaire pour déterminer si le projet de commercialisation est viable et mérite des recherches plus approfondies ou non. Celle-ci a été réalisée selon le canevas habituel des projets d'Innovus et est disponible en annexe D.

La conclusion de cette analyse amènerait à poursuivre les recherches et le processus de commercialisation. En effet, il n'y pas beaucoup de compétition sur le marché actuel. Les seuls compétiteurs sont les compagnies du réseau électrique ainsi que les fournisseurs de panneaux solaires et d'éoliennes mais ceux-ci ne visent pas la même clientèle que cette technologie-ci. De plus, le concept innovant, tant dans la géométrie de l'éolienne que dans le processus de fabrication est très attrayant et pourrait amener de nombreux clients.

Une première étape à réaliser pour poursuivre la recherche sur la commercialisation est de concevoir une brochure reprenant les principales caractéristiques de la technologie et détaillant ses points forts. Celle-ci doit avoir un aspect parfait pour

faire une bonne première impression et attirer les éventuels partenaires. La brochure réalisée se trouve en annexe E.

Conclusions

L'objectif de ce travail de fin d'étude consistait en la réalisation d'une petite éolienne à axe vertical répliquable aux quatre coins de la planète sans matériel spécifique et à un coût minimum.

En vue d'élaborer ce prototype, différentes étapes ont été accomplies :

- L'implémentation d'une méthode numérique à l'aide de *MATLAB* permettant d'étudier l'aérodynamique d'une éolienne à axe vertical. La méthode choisie est le Double Multiple Streamtube Method dont le concept est celui d'une BEM, pour laquelle les spécificités géométriques du rotor ont dû être considérés. Afin d'affiner les résultats, nous avons également réalisé une extension des polaires utilisées et pris en compte le décrochage dynamique ainsi que l'effet de courbure.
- La conception du prototype qui s'est avérée très complexe pour plusieurs raisons. D'une part nous avons voulu profiter des avantages liés à l'utilisation de l'impression 3D qui permet de réaliser des géométries innovantes. D'autre part nous avons été confrontés aux limites de cette technologie, principalement en terme de dimensions admissibles. Aussi, les nombreuses dimensions variables rendent le problème difficile à optimiser. La structure de notre éolienne a finalement été choisie sur base d'un compromis entre ce qu'il était possible de réaliser et ce qui offrait les meilleures performances.
- L'étude des différentes contraintes mécaniques agissant sur le système de manière à effectuer un dimensionnement de chaque composant.
- La réalisation du prototype afin de démontrer qu'il est tout à fait possible de construire et mettre en service une éolienne à l'aide de matériaux mis en œuvre par prototypage rapide et de quelques pièces standards supplémentaires.

La mise en place d'un banc d'essai, en particulier les appareils électriques de mesures, l'électronique de puissance et l'interface de contrôle, a ensuite permis de

tester le prototype. Deux observations majeures ont été effectuées. Tout d'abord, ce prototype dont chaque composant a été dimensionné par nos soins s'est révélé suffisamment résistant pour des conditions d'utilisation supérieures à la moyenne. Cela valide le dimensionnement du point de vue de la résistance des matériaux. Ensuite, les résultats expérimentaux ne répondent pas aux attentes théoriques. Nous avons alors tenté de justifier ces écarts à l'aide d'études complémentaires. Cela nous a permis de proposer les pistes d'améliorations reprises ci-après.

Pistes d'amélioration

Des modifications sont à envisager du point de vue aérodynamique de l'éolienne:

- Modifier le profil des pâles afin de contrer l'effet de courbure induit par la rotation.
- Implémenter une méthode numérique 3D d'étude aérodynamique afin de mieux capturer les effets de la géométrie complexe des pales (la DMST utilisée étant une méthode 2D).
- Conserver l'idée de la troposkine mais en vérifiant la forme de la courbe qui serait adoptée par un câble attaché à un rayon non nul et avec un angle de sweep. En effet, la troposkine est une courbe 2D alors que notre problématique est 3D.
- Améliorer la forme des plateaux afin de réduire la traînée parasite. Il serait également envisageable de les remplacer par des bras profilés, bien que leur fabrication nécessite des techniques plus complexes.

Ensuite, d'autres travaux pourraient être effectués en vue d'améliorer l'éolienne dans son ensemble.

- Le dimensionnement théorique du générateur pourrait être validé par des simulations numériques plus précises afin de déterminer le générateur le mieux adapté à cette éolienne, pour ensuite le fabriquer.
- L'électronique de puissance disponible au laboratoire permet de faire une régulation MPPT de l'éolienne. Cependant, un modèle réel à installer dans une habitation devrait être autonome et équipé de cette électronique miniaturisée.

En conclusion, le choix d'un rotor hybride entre une troposkine et une hélicoïdale, qui plus est, fabriqué en impression 3D, est un pari risqué qui méritait d'être tenté.

Bien que les résultats soient décevants par rapport aux attentes, il faut savoir que lors de la conception d'un nouveau produit, la réalisation d'un premier prototype ne conduit que rarement aux résultats escomptés. Il est dès lors normal de devoir apporter des modifications en vue de la conception d'un nouveau prototype.

Les quelques améliorations citées ci-dessus pourraient conduire à dès résultats rencontrant l'objectif premier qui est la production d'énergie récupérable et utilisable dans une habitation.

L'intérêt de poursuivre les travaux à été confirmé par l'évaluation économique réalisée dans le cadre de ce travail, en collaboration avec Innovus.

Une autre solution, mais qui sort du cadre de ce TFE, consisterait à réaliser une éolienne à axe horizontale dont la fabrication est plus aisée et les performances supérieures.

Annexe A

Résultats en soufflerie

A.1 Mesures de vitesse de vent

Diamètre 1	Diamètre 2	Diamètre 3
f = 20 Hz , V = 4.15 m/s		
3.6	3.5	3.8
4.3	4.0	4.3
4.52	4.0	4.14
4.31	4.43	4.5
4.1	4.3	4.75
3.8	3.95	4.45
f = 25Hz , V = 5.21 m/s		
4.3	4.7	5.0
5.35	5.25	5.5
5.7	5.2	5.2
5.35	5.3	5.7
5.2	5.6	5.85
4.5	4.7	5.45
f = 30 Hz, V = 6.45 m/s		
5.85	6.15	6.2
6.75	6.8	7.0
6.8	6.4	6.65
6.7	6.3	6.5
6.55	7.0	6.5
5.7	6.2	6.1

Diamètre 1	Diamètre 2	Diamètre 3
f = 35 Hz, V= 7.57 m/s		
7.6	7.35	7.7
8.25	8.5	7.8
8.05	7.6	7.55
7.4	7.5	7.55
7.7	7.35	7.95
6.45	6.4	7.5
f = 40 Hz, V= 8.43 m/s		
7.6	8.0	7.4
8.4	8.5	9.3
9.5	8.3	8.4
8.65	8.9	9.0
8.3	9.0	9.1
7.15	7.8	8.4
f = 45 Hz, V= 9.32 m/s		
8.1	8.4	9.2
9.8	9.4	9.8
10.5	8.0	8.6
9.4	9.2	10.0
9.3	9.7	10.8
8.1	9.1	10.3
f = 50 Hz, V= 10.3 m/s		
8.7	8.9	9.55
10.9	10.5	10.5
11.5	10.2	9.7
10.5	11.05	11.05
10.0	10.8	11.9
9.3	9.95	10.7

Table A.1: Mesures des vitesses de vent en fonction de la fréquence

Annexe B

Fiches techniques

Cette annexe reprend en premier lieu la fiche technique de la méthode de fabrication additive "fused deposition modeling". Le principe est brièvement expliqué et est suivi d'une série de caractéristiques permettant de déterminer les applications de ce procédé.

Suivent ensuite les fiches techniques des matériaux généralement utilisés pour cette technique de fabrication, le PLA et l'ABS. Ces fiches reprennent beaucoup d'informations telles que les compositions des matériaux, leurs propriétés mécaniques ou thermiques, leurs empreintes écologiques et bien d'autres encore.

Notons que ces fiches techniques proviennent toutes trois du logiciel *CES Selector*. Celui-ci est un outil permettant la sélection rationnelle de matériaux d'ingénierie - métaux, polymères, céramiques, composites - et de procédés de fabrication - mise en forme, finition, traitement de surface.

Fused deposition

General

Designation

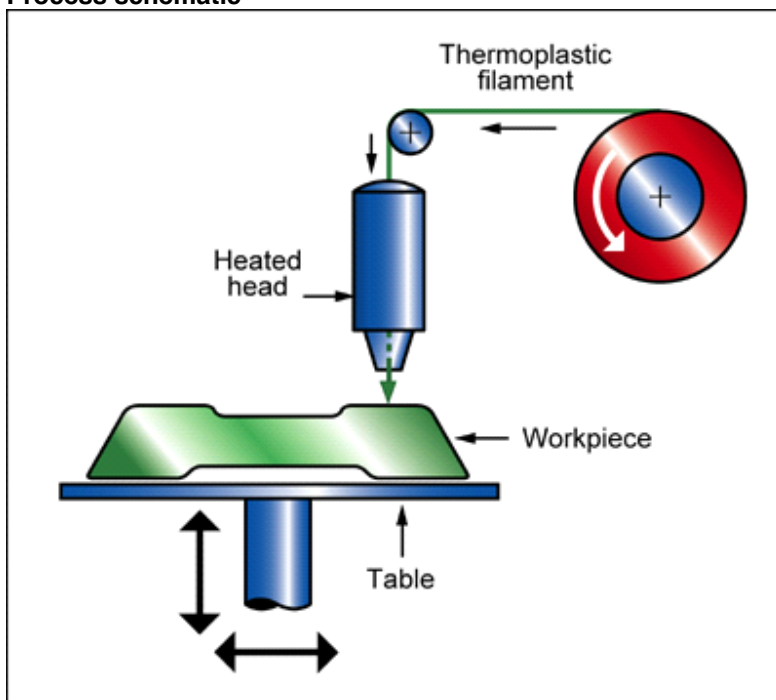
Additive Manufacturing: Fused Deposition

The process

FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM) is an additive manufacturing technique suitable for use in an office environment. A fine stream of molten material (usually thermoplastic) is deposited by a two-axis heated extrusion head. Semi-liquid thermoplastic material is extruded and then deposited one layer at a time starting at the base. This builds the model vertically on a fixtureless base. Successive layers adhere together through thermal fusion. The FDM process requires no post-production UV curing, enabling multiple versions of a part to be created within a short time frame. This is the most widely used additive manufacturing method for home and office use due to the low machine and operating costs. As with other additive manufacturing processes, a CAD solid model of the part is required.

The process is also known as material extrusion, Fused Filament Fabrication (FFF) or plastic jet printing.

Process schematic



Shape

Circular prismatic
Non-circular prismatic
Flat sheet
Dished sheet
Solid 3-D
Hollow 3-D

True
True
True
True
True
True

Physical attributes

Mass range

* 0,1 - 15 kg

Range of section thickness	0,5	-	100	mm
Tolerance	0,127	-	2	mm
Roughness	* 100	-	125	µm

Process characteristics

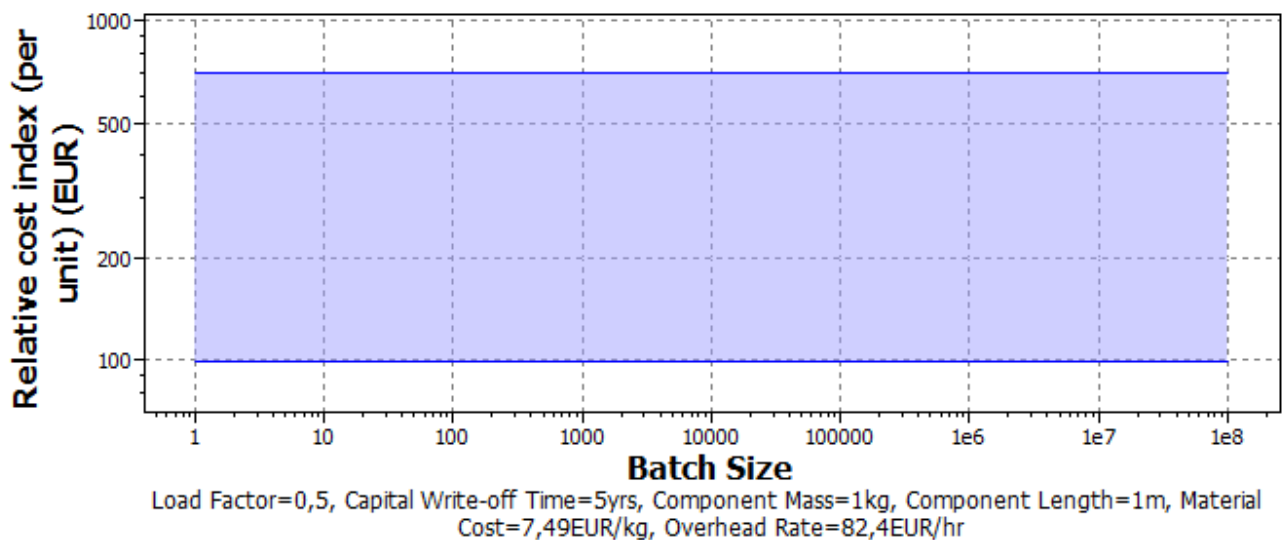
Primary shaping processes	True
Secondary shaping processes	False
Machining processes	False
Prototyping	True
Discrete	True
Continuous	False

Economic attributes

Economic batch size (units)	1	-	10
Labor intensity	low		

Cost modeling

Relative cost index (per unit) * 98,6 - 706 EUR
Parameters: Material Cost = 7,49EUR/kg, Component Mass = 1kg, Batch Size = 1e3, Overhead Rate = 82,4EUR/hr, Capital Write-off Time = 5yrs, Load Factor = 0,5



Capital cost	7,06e4	-	2,99e5	EUR
Material utilization fraction	* 0,9	-	0,98	
Production rate (units)	0,13	-	1	/hr
Tool life (units)	1e5	-	1e6	
Tooling cost	* 0	-	0,0749	EUR

Supporting information

Design guidelines

Support structures (which can be removed later) are required in addition to the main body of the object for overhangs. Due to the rounded bead, sharp angles are not possible and small voids occur where the deposition direction changes so there is porosity in some areas. This porosity may be reduced at the expense of surface finish.

Technical notes

The build envelope (L x W x H) ranges from 127 x 127 x 127 mm to 914 x 610 x 914 mm.
Typical layer thickness is 78 - 330 μm .

A variety of materials and colors can be used for model building including ABS, wax-filled plastic adhesive material, proprietary nylon, investment casting wax and possibly metals with a low melting point.

Typical uses

Making prototypes and models quickly from CAD systems.

The economics

Prices range from around \$200 for DIY assembly machines, to \$1500 for ready-assembled, to \$15000 for industrial models. Objects cost around \$0.40 per cubic cm.

The environment

The materials are non-toxic. There is minimum material wastage in the method.

No warranty is given for the accuracy of this data

PLA (general purpose)

General information

Designation

Poly lactide / Polylactic acid (General purpose)

Tradenames

BOPLA; LACEA; Lactel; NatureWorks Ingeo; Purasorb; TORAY Ecodear; NATUREPLAST; Futerro; TRANSMARE; Jackdaw PLA; RTP Compounds; deTerra® Biobased Polymers; ECOGEHR PLA-L (GEHR GmbH); Bio-Flex® (FKuR Kunststoff GmbH)

Typical uses

biodegradable packing and disposables, food packaging, plastic bags, plant pots, diapers, bottles, cold drink cups, sheet and film products, electronic cases, home textiles, clothing, medical implants, homeware, personal care products

Composition overview

Compositional summary

(CH(CH₃)CO₂)_n. The lactic acid is produced from sugar (dextrose) with plant starch origins e.g. corn, wheat, sugar beets and sugar cane.

Material family	Plastic (thermoplastic, semi-crystalline)
Base material	PLA (Polylactic acid / polylactide)
Renewable content	100 %
Polymer code	PLA

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	100	%
---------	-----	---

Price

Price	* 1,65	- 1,98	EUR/kg
-------	--------	--------	--------

Physical properties

Density	1,24e3	- 1,27e3	kg/m ³
---------	--------	----------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	3,3	- 3,6	GPa
Yield strength (elastic limit)	55	- 72	MPa
Tensile strength	47	- 70	MPa
Elongation	2,5	- 6	% strain
Elongation at yield	2	- 3,5	% strain
Compressive modulus	* 3,3	- 3,6	GPa
Compressive strength	66	- 86,4	MPa
Flexural modulus	3,1	- 3,6	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	83	- 108	MPa
Shear modulus	* 1,2	- 1,29	GPa
Bulk modulus	* 5,7	- 6,3	GPa
Poisson's ratio	* 0,38	- 0,4	
Shape factor	7,2		
Hardness - Vickers	17	- 22	HV
Hardness - Rockwell M	* 50	- 54	
Hardness - Rockwell R	* 32	- 35	
Hardness - Shore D	79	- 83	

Fatigue strength at 10⁷ cycles
Mechanical loss coefficient (tan delta)

* 22,2 - 27,7 MPa
* 0,0747 - 0,0793

Impact & fracture properties

Fracture toughness
Impact strength, notched 23 °C
Impact strength, unnotched 23 °C

* 3,34 - 4,79 MPa.m^{0.5}
1,3 - 2,8 kJ/m²
16 - 25 kJ/m²

Thermal properties

Melting point
Glass temperature
Heat deflection temperature 0.45MPa
Heat deflection temperature 1.8MPa
Vicat softening point
Maximum service temperature
Minimum service temperature
Thermal conductivity
Specific heat capacity
Thermal expansion coefficient

145 - 175 °C
52 - 60 °C
51 - 56 °C
* 48,5 - 53,2 °C
* 51 - 56 °C
* 45 - 55 °C
-20 - -12 °C
0,13 - 0,16 W/m.°C
1,18e3 - 1,21e3 J/kg.°C
* 126 - 145 µstrain/°C

Electrical properties

Electrical resistivity
Dielectric constant (relative permittivity)
Dissipation factor (dielectric loss tangent)
Dielectric strength (dielectric breakdown)

3,1e17 - 6e17 µohm.cm
3,04 - 3,16
0,00909 - 0,011
* 16,4 - 17 MV/m

Optical properties

Refractive index
Transparency

1,44 - 1,46
Transparent

Magnetic properties

Magnetic type

Non-magnetic

Absorption & permeability

Water absorption @ 24 hrs
Water absorption @ sat
Humidity absorption @ sat
Water vapor transmission
Permeability (O₂)

* 0,24 - 0,26 %
0,95 - 1,1 %
* 0,29 - 0,32 %
7,1 - 9,1 g.mm/m².day
11 - 53 cm³.mm/m².day.atm

Processing properties

Polymer injection molding
Polymer extrusion
Polymer thermoforming
Linear mold shrinkage
Melt temperature
Mold temperature
Molding pressure range

Acceptable
Acceptable
Acceptable
0,3 - 0,4 %
170 - 210 °C
10 - 25 °C
55 - 100 MPa

Durability

Water (fresh)
Water (salt)
Weak acids
Strong acids

Acceptable
Acceptable
Acceptable
Unacceptable

Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Unacceptable
Organic solvents	Limited use
Oxidation at 500C	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Good
Flammability	Highly flammable

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	49,2	-	54,2	MJ/kg
Sources	29.2 MJ/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005); 40.1 MJ/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005); 48.8 MJ/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005); 54.1 MJ/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005); 62.1 MJ/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005); 75.4 MJ/kg (Vink et al. 2007)			
CO2 footprint, primary production	2,65	-	2,93	kg/kg
Sources	1.2 kg/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005); 1.89 kg/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005); 3 kg/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005); 3.84 kg/kg (Vink et al. 2007); 4 kg/kg (Institute for Prospective Technological Studies, 2005)			
Water usage	* 1,25e3	-	1,38e3	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Polymer extrusion energy	* 5,79	-	6,09	MJ/kg
Polymer extrusion CO2	* 0,434	-	0,456	kg/kg
Polymer extrusion water	* 4,75	-	7,13	l/kg
Polymer molding energy	* 14	-	14,7	MJ/kg
Polymer molding CO2	* 1,05	-	1,1	kg/kg
Polymer molding water	* 10,5	-	15,7	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	0,532	-	0,559	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	0,0399	-	0,042	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	0,934	-	0,975	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	0,0698	-	0,0734	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	1,38	-	1,45	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	0,103	-	0,109	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	True			
Embodied energy, recycling	* 16,7	-	18,4	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 0,9	-	0,995	kg/kg
Recycle fraction in current supply	0,1	-	1,1	%
Downcycle	True			
Combust for energy recovery	True			
Heat of combustion (net)	* 18,9	-	19,9	MJ/kg
Combustion CO2	* 1,8	-	1,9	kg/kg
Landfill	True			
Biodegrade	True			

Notes

Other notes

PLA is a renewable thermoplastic polyester manufactured from plants such as sugarcane, corn and tapioca. PLA can be amorphous or semi-crystalline. Various blends of D and L enantiomers are available, making available a broader range of properties. PLA products are considered environmentally friendly as their production uses approximately 50% less energy and produces 60% less CO2 than petroleum based products e.g. PET, PC, PS and nylon.

No warranty is given for the accuracy of this data

ABS (extrusion)

General information

Designation

Acrylonitrile Butadiene Styrene (Extrusion)

Tradenames

Abelac; Abifor; Abstron; Absylux; Acstyr; Akmaril; Alcom; Anjalin; Aplax; Arradur; Astalac; Athpol; Aurocil; Bapolan; Bulksam; Certene; Cevian; Claradex; Collimate; Compolac; Cycoele; Cycogel; Cycholac; Dafnelac; Delta; Denisab; Diapet; Diastat; Dynacom; Endura; Ensidur; Espree; Estadiene; Excelloy; Faradex; Farralloy; Fiberfil; Forsan; Hanalac; Highlac; Hiloy; Hylac; Isolac; Isopak; Kane Ace; Kapstone; Kralastic; Lastilac; Lupros; Lustran; Lustropak; Magnum; Nevies; Nilac; Novodur; Osstyrol; Palran; Perlac; Permastat; Plasfil; Polidux; POLYabs; Polyfabs; Polyflam; Polylac; Polyman; Porene; Pre-Elec; Remex; Retain; Ronfalin; Rotec; Santac; Senosan; Seracril; Shinko-lac; Sicoflex; Sinkral; Starex; Stylac; Superex; Tairilac; Taitalac; Tarodur; Tecaran; Techno; Tekral; Terblend; Terez; Terluran; Tomax; Toyolac; Toyolacparel; Triax; Tufbaria; Tynab; UclAxs; Ultrastyr; Umastyr; Unibrite; Vampsab; Whistatt

Typical uses

Safety helmets; camper tops; automotive instrument panels and other interior components; pipe fittings; home-security devices and housings for small appliances; communications equipment; business machines; plumbing hardware; automobile grilles; wheel covers; mirror housings; refrigerator liners; luggage shells; tote trays; mower shrouds; boat hulls; large components for recreational vehicles; weather seals; glass beading; refrigerator breaker strips; conduit; pipe for drain-waste-vent (DWV) systems.

Composition overview

Compositional summary

Block terpolymer of acrylonitrile (15-35%), butadiene (5-30%), and Styrene (40-60%).

Material family	Plastic (thermoplastic, amorphous)
Base material	ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)
Polymer code	ABS

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	100	%
Price		
Price	* 1,93 - 2,13	EUR/kg

Physical properties

Density	1,02e3 - 1,08e3	kg/m^3
---------	-----------------	--------

Mechanical properties

Young's modulus	2 - 2,9	GPa
Yield strength (elastic limit)	29,6 - 44,1	MPa
Tensile strength	30 - 50	MPa
Elongation	20 - 100	% strain
Compressive modulus	1,03 - 2,68	GPa
Compressive strength	* 35,9 - 69	MPa
Flexural modulus	1,2 - 2,8	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	40 - 80	MPa
Shear modulus	* 0,319 - 1,03	GPa
Bulk modulus	* 2,76 - 2,9	GPa
Poisson's ratio	0,394 - 0,422	

Shape factor	6,3		
Hardness - Vickers	* 8,9	- 13,2	HV
Hardness - Rockwell M	* 54	- 60	
Hardness - Rockwell R	75	- 115	
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 12	- 20	MPa
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0,0138	- 0,0446	

Impact & fracture properties

Fracture toughness	1,9	- 2,1	MPa.m ^{0.5}
Impact strength, notched 23 °C	7,9	- 63	kJ/m ²
Impact strength, notched -30 °C	5,44	- 12,1	kJ/m ²
Impact strength, unnotched 23 °C	108	- 200	kJ/m ²
Impact strength, unnotched -30 °C	66,7	- 200	kJ/m ²

Thermal properties

Glass temperature	88	- 120	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	77	- 113	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	77	- 104	°C
Maximum service temperature	* 62	- 77	°C
Minimum service temperature	-45	- -35	°C
Thermal conductivity	* 0,226	- 0,235	W/m.°C
Specific heat capacity	1,39e3	- 1,41e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	108	- 234	µstrain/°C

Electrical properties

Electrical resistivity	3,3e21	- 3e22	µohm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	2,8	- 3,2	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0,003	- 0,006	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	13,8	- 19,7	MV/m
Comparative tracking index	400	- 600	V

Optical properties

Refractive index	1,53	- 1,54	
Transparency	Opaque		

Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic		
---------------	--------------	--	--

Absorption & permeability

Water absorption @ 24 hrs	0,2	- 0,45	%
Water vapor transmission	2,04	- 3,2	g.mm/m ² .day
Permeability (O ₂)	47,3	- 78,5	cm ³ .mm/m ² .day.atm

Processing properties

Polymer injection molding	Excellent		
Polymer extrusion	Excellent		
Polymer thermoforming	Excellent		
Linear mold shrinkage	0,4	- 0,7	%
Melt temperature	177	- 260	°C
Mold temperature	50	- 70	°C
Molding pressure range	* 55	- 172	MPa

Durability

Water (fresh)	Excellent		
---------------	-----------	--	--

Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Limited use
Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Excellent
Organic solvents	Unacceptable
Oxidation at 500C	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Poor
Flammability	Highly flammable

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	90,6	-	99,9	MJ/kg
Sources	95 MJ/kg (Kemna et al. 2005); 95 MJ/kg (Franklin Associates, 2008); 95.3 MJ/kg (PlasticsEurope, 2010); 95.3 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008)			
CO2 footprint, primary production	3,45	-	3,81	kg/kg
Sources	3.32 kg/kg (Kemna et al. 2005); 3.76 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3.8 kg/kg (PlasticsEurope, 2010)			
Water usage	* 167	-	185	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Polymer extrusion energy	* 5,78	-	6,39	MJ/kg
Polymer extrusion CO2	* 0,434	-	0,48	kg/kg
Polymer extrusion water	* 4,81	-	7,22	l/kg
Polymer molding energy	* 17,6	-	19,5	MJ/kg
Polymer molding CO2	* 1,32	-	1,46	kg/kg
Polymer molding water	* 12,2	-	18,2	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0,925	-	1,02	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,0694	-	0,0767	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 4,98	-	5,5	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,373	-	0,413	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 9,48	-	10,5	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0,711	-	0,786	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	True			
Embodied energy, recycling	* 30,7	-	34	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1,17	-	1,29	kg/kg
Recycle fraction in current supply	3,8	-	4,2	%
Downcycle	True			
Combust for energy recovery	True			
Heat of combustion (net)	* 37,6	-	39,5	MJ/kg
Combustion CO2	* 3,06	-	3,22	kg/kg
Landfill	True			
Biodegrade	False			

No warranty is given for the accuracy of this data

Annexe C

Business Model Canvas

Cette annexe comprend le business model réalisé pour une première approche commerciale du projet. Celui-ci a été réalisé avec l'aide d'Innovus, une compagnie liée à l'université de Stellenbosch et qui s'occupe de la commercialisation de projets innovants. Le canevas utilisé est celui développé par Alexander Osterwalder [4] et dont l'idée principale est de présenter sous forme synthétique les différents acteurs et moyens nécessaires pour éventuellement parvenir à commercialiser la technologie. Les différents facteurs étudiés sont les suivants (dans l'ordre dans lequel il faut remplir ce tableau):

- **Customer segments:** Clients susceptibles d'être intéressés par la technologie et identification de leurs besoins
- **Value proposition:** Technologie mise en place pour répondre aux besoins des clients ciblés
- **Channels:** Moyens utilisés pour connecter les clients avec la proposition
- **Customer relationship:** Relation établie entre les clients et l'entreprise
- **Revenue streams:** Source de revenus dans l'entreprise
- **Key partners:** Partenaires et fournisseurs nécessaires
- **Key activities:** Étapes restantes à réaliser avant l'aboutissement du projet
- **Key ressources:** Ressources essentielles à la réussite
- **Cost structure:** Ensemble des coûts liés de près ou de loin au projet

The business model Canvas

3D printed Wind Turbine

25-Jun-2016

Iteration #3

Key Partners	Key Activities	Value Proposition	Customer Relationship	Customer Segments
Facebook, google, .. for advertising	Website Trademark Patent Platform Manual	3D printed wind-turbine able to charge a cellphone or a 24V battery without connection to the grid	Maintenance service claim form on the website	Households in areas without electricity
Delivery service				Camping owners
Batteries companies				Sailors
Universities				Eco-friendly people living in urban areas
3D printers owners	Key Resources Position: center of Europe Website Innovative Design My team	Drawns and manual to build that turbine	Channels Website (dowload or order) Platform with kind of Airbnb 3D printer	Wind tubrine manufacturers (Reseller)
Cost Structure		Revenue Streams		
Salary	Materials for building 2 prototypes	Price for the drawns/manual		
Website				
Printer	Delivery service	Price of the device		
Administration Office		Subscription for post-purchase service (maintenance)		

Annexe D

Évaluation commerciale de la technologie

Cette annexe détaille une évaluation de la viabilité du projet. Celle-ci reprend une description de la technologie et des raisons pour lesquelles elle serait adaptée à certains types de clients. L'aspect financier actuel est également expliqué et suivi d'une description du marché, y compris l'identification des éventuels concurrents. Cette évaluation est conclue par la décision finale de continuer les recherches ou non.



INNOVUS

INNOVUS PROJECT EVALUATION

Project Name: 3D printed wind turbine

Date: 25 / 06 / 2016

SUMMARY

- **Project description:** Vertical axis wind turbine built by rapid prototyping or basic components and able to charge a 24V battery. It can be manufacturable wherever a printer is available
- **Reason:** Could be of great utility in places where there isn't any access to the grid electricity such as small villages in developing countries or on a boat.
- For eco-friendly people who live in urban areas



INNOVUS

TECHNOLOGY (1)

- **Inventors:** Project done in the framework of a master thesis for obtaining the title of Mechanical Engineer
- **Faculty involved:** Faculty of engineering at Université catholique de Louvain (Belgium)
- **Existing problem:** Lots of communities, everywhere in the world, still don't have any access to the electricity. Global warming and decrease in fossile fuels.
- **How it is solved by this technology ?** : With this cost-effective technology, people could charge a phone or a battery, only with the energy of the wind

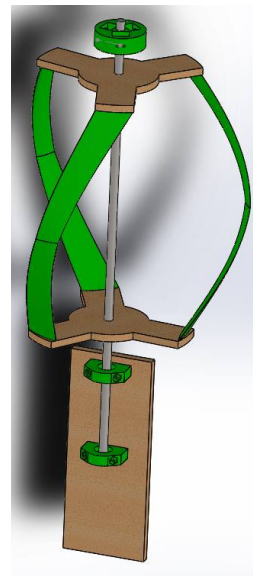


INNOVUS



TECHNOLOGY (2)

- **Stage of development:** Still in research stage and construction of the first prototype
- **Time to market:** +- 2 years
- **Prototype:** Needs to be assembled and tested in a wind tunnel



INNOVUS



TECHNOLOGY (3)

- IP
 - **Disclosures:** Master Thesis
 - **IP Ownership:** Faculty of engineering – Université catholique de Louvain (Belgium)
 - **Novelty:** New design and fabrication process
 - **Protection:** Trademark, possible patent



INNOVUS



FINANCIAL

- **Was this researched funded ?** Research fully funded by the Catholic University of Louvain
- **Agreements in place ?** No agreement has yet been established for a possible further research at the end of the thesis or for a potential marketing
- **Does this project needs funding ?** If a marketing is possible it will obviously needs fundings



INNOVUS



MARKET (1):

- **Barriers to entry:** need of a 3D printer (and laser cutter)
- **Customers :** eco-friendly people who lives in urban areas, households in developing countries
- **Commercialisation strategy:** Webiste that allow
 - Downloading draws and construction manual
 - Ordering an already assembled design + delivery service



INNOVUS



MARKET (2): MARKET SEGMENTS

- Energy → Renewable energy → Wind energy → Wind
turbine → Vertical axis wind turbine → Small Wind
turbine → 3D printed small wind turbine



INNOVUS



MARKET (2): COMPETITORS

- Grid companies
- Wind turbine manufacturers
- Solar panels manufacturers



INNOVUS

UNIVERSITEIT
STELLENBOSCH
UNIVERSITY

RECOMMENDATION

- Recommendation : PROCEED
- Reason(s) : not a lot of competition, new concept/
innovative



INNOVUS

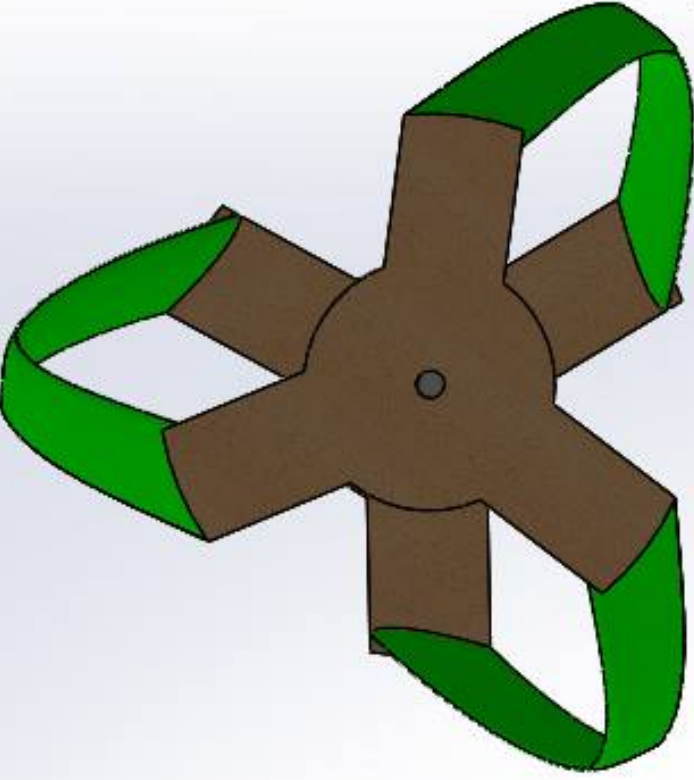
UNIVERSITEIT
STELLENBOSCH
UNIVERSITY

Annexe E

Brochure marketing

Cette annexe présente la brochure marketing de ce projet. Une bonne approche marketing commence toujours par une brochure du projet à vendre. Celle-ci constitue le premier regard qu'aura un éventuel partenaire sur la technologie et doit donc présenter celle-ci de manière à ce que le lecteur soit conquis et ait envie d'en savoir plus. Elle doit avoir un aspect irréprochable et décrire les caractéristiques principales du projet en mettant en avant ses atouts. Les différentes sections sont:

- Brève description
- Clients cibles
- Avantages de la proposition
- Caractéristique qui la rend unique
- Description technique
- Chercheurs principaux impliqués



CONTACT

OFFICE: +27 (21) 808 3826
FAX: +27 (21) 808 3913
EMAIL: info@innovus.co.za



INNOVUS

3D printed Wind turbine

Innovus Technology Transfer (PTY) Ltd is Stellenbosch University's wholly-owned technology transfer company. Contact Anita Nel, Innovus Chief Executive Officer, on (021) 808 3826 or send an email to ajnel@sun.ac.za for more information.



INNOVUS

BRIEF DESCRIPTION

This 3D printed wind turbine aims to provide electricity without the need of being connected to the electricity grid. This could allow people to charge a cellphone or a 24V battery. Made with 3D printed parts and standards components, everybody who has access to a 3D printer would be able to build its own wind turbine.

This wind turbine is appropriate and cost-effective for urban areas which don't have any access to the grid.

TARGET MARKET

- Wind-turbine manufacturers that could act as resellers
- Households in areas without any access to electricity
- People such as camping owners or sailors
- Eco-friendly people living in urban areas

VALUE PROPOSITION / BENEFITS

The materials needed can be found in many places in the world and at low cost.

Modifications in the design of the blades can easily be made and still being printed at a low cost.

More efficient on rooftops, it is a great advantage since it doesn't need extra large areas.

UNIQUE CHARACTERISTIC

The device will be built only with 3D printed parts or basic components such as the following:

- MDF wood (Medium Density Fiberboard) cut with a laser cutter for the 2 trays
- Bicycle brake cable to strengthen the blades
- Threaded rod
- Nuts
- Ball-bearings
- Generator (magnets, wire, 3D printed piece for the stator, bearings)

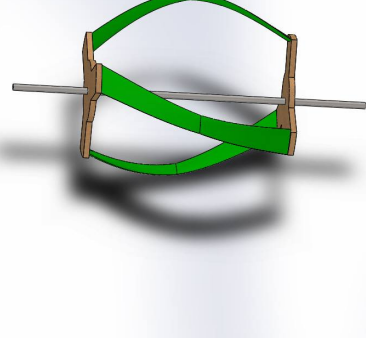
TECHNICAL DESCRIPTION

The turbine has 3 blades which have a specific shape, a mix between two existing types of rotor: the darrieus troposkine blades and the darrieus helical blades. The asset of the troposkine shape is that it minimizes bending stresses and fatigue loads. On the other hand, helical blades are useful to smooth the torque over a rotation. Thanks to the design possibilities that a 3D printer offers, our rotor is then a combination of these two.

Moreover, the minimum radius is 18cm (instead of +/- 0cm for a troposkine rotor) in order to broaden the swept area and increase the output power. The maximum radius, at the center, is 32 cm. Since the blades have a variable radius, for a given rotational speed, the optimum point doesn't work at the same solidity for each section of the blades. That is why we design the blades with a chord (distance between leading and trailing edges) of 9 cm at the smallest radius, and of 5.5 cm at the biggest. That way, each section works at its optimum point.

Due to the maximum size of the printer, each blade is made in 6 different parts. Inside them, we put two cables (bicycle brake cables) in order to 1) bind the pieces together and 2) strengthen the blades so that the stresses are applied to the cables and not to the ABS. On top and bottom, we fix a 3D printed piece to the rod with nuts and the cables are attached to it with a tightening device.

The generator will have an output voltage of 24V to be able to charge a battery. It is a synchronous axial flux generator with permanent magnets.



The materials needed can be found in many places in the world and at low cost.

PRINCIPAL RESEARCHERS

Marie Donnay, student in mechanical engineering, Université catholique de Louvain

Quentin Lallemand, student in electro-mechanical engineering, Université Catholique de Louvain

Pr. Bruno Dehez, Department of Mechanical Engineering, Université catholique de Louvain

Pr. Philippe Chatelein, Department of Mechanical Engineering, Université catholique de Louvain

Références

- [1] 3d printing systems: Up mini. <http://3dprintingsystems.com/products/up-mini-3d-printer/>. Consulté le 13/04/2016. 80
- [2] Actualitix, accès à l'électricité. <http://fr.actualitix.com/pays/wld/acces-a-l-electricite.php>. Consulté le 11/08/2016. i, 2
- [3] Airfoil tools. <http://airfoiltools.com>. Consulté le 20/04/2016.
- [4] The business model canvas. <http://businessmodelgeneration.com/canvas/bmci>. Consulté le 03/07/2016. 115, 137
- [5] Catalogue leboutte. https://www.leboutte.be/catalogue_fr_quincaillerie_boulonnerie_tige-filetee.html. Consulté le 15/06/2016. v, 51
- [6] The fortus 250 mc 3d printer. <http://proto3000.com/fortus-250mc.php>. Consulté le 13/04/2016. 80
- [7] International energy agency. <http://www.worldenergyoutlook.org/>. Consulté le 11/08/2016. i, 1
- [8] Les imprimantes 3d. <https://www.lesimprimantes3d.fr/comparateur/imprimante3d/bq/witbox-1/>. Consulté le 13/04/2016. 80
- [9] Limite de betz. https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz. Consulté le 21/07/2016. 11
- [10] Machines laser et cnc, howpublished = <http://www.mllaser-co2.com/ml-w640.ws>, note = Consulté le 13/07/2016. 84
- [11] Mon univers 3d: histoire de l'impression 3d. <http://http://www.monunivers3d.com>. Consulté le 15/08/2016. 77
- [12] Partool: The industrial reserve. <http://www.partool.be>. Consulté le 10/06/2016. 71, 72

- [13] Qblade: open source calculation software. <http://www.q-blade.org/>. Consulté le 20/06/2016. 26, 35
- [14] Site du makilab. <https://makilab.org/>. Consulté le 13/07/2016. 84
- [15] Skipping rope curve. <http://www.mathcurve.com/courbes2d/cordeasauter/cordeasauter.html>. Consulté le 10/02/2016. 13
- [16] Spécifications de l'abs et des caractéristiques de l'impression 3d. <https://i.materialise.com/3d-printing-materials/abs>. Consulté le 15/05/2016. 81
- [17] Xfoil: Subsonic airfoil development system. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>. Consulté le 16/04/2016. 26
- [18] BEAUDET, L. *Etude expérimentale et numérique du décrochage dynamique sur une éolienne à axe vertical de forte solidité*. 2014. i, 34, 43, 110
- [19] BOS, R. *Self-Starting of a small urban Darrieurs rotor: Strategies to boost performance in low-Reynolds-number flows*. 2012. i, 24
- [20] CROS, J., AND VIAROUGE, P. *Synthesis of High Performance PM Motors With Concentrated Windings*. 2002. iii, 91
- [21] FRERIS, L., AND SHARPE, D. *Wind energy conversion systems*. 1990. 19
- [22] GIERAS, J. F., WANG, R.-J., AND KAMPER, M. J. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. 2004. iii, 86, 87, 88, 92
- [23] ISLAM, M., TING, D., AND FARTAJ, A. *Design of a Special-purpose Airfoil for Smaller-Capacity Straight-Bladed VAWT*. 2007. 40
- [24] JUVINALL, R. C., AND MARSHEK, K. M. *Fundamentals of Machine Component Design*. 2011. 57, 59, 72, 73
- [25] LATOUFIS, K., MESSINIS, G., KOTSAMPOPOULOS, P., AND HATZIARGYRIOU, N. *Axial Flux Permanent Magnet Generator Design for Low Cost Manufacturing of Small Wind Turbines*. 2012. 89, 94
- [26] MARSHALL, L., AND BUHL, J. *A new empirical relationship between thrust coefficient and induction factor for the turbulent windmill state*. 2005. 28
- [27] MAXON. *Program 2012/13. High Precision Drives and Systems*. 2012. iii, 97
- [28] MULJADI, E., BUTTERFIELD, C. P., AND WAN, Y.-H. *Axial Flux, Modular, Permanent Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications*. 1998. 86

- [29] NEWMAN, B. G. *Multiple actuator-disk theory for wind tubrines*. 1986. 19
- [30] NISITANI, H., AND NODA, N.-A. *Stress Concentration of a Cylindrical Bar with a V-Shaped Circumferential Groove under Torsion, Tension or Bending*. 1984. ii, 56, 57
- [31] PARASCHIVOIU, I. *Wind turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. 2002. 16, 34, 40
- [32] SKF. *Catalogue général SKF*. 2006. ii, 68, 69, 71, 72
- [33] SORAGHAN, C. E. *Aerodynamic modelling and control of vertical axis wind turbine*. 2014. i, 16, 19, 28, 33, 34, 40
- [34] TANGLER, J., AND DAVID KOCUREK, J. *Wind turbine Post-Stall Airfoil Performance Characteristics Guidelines for Blade-Element Momentum Methods*. 2005. 35
- [35] TAVERNE, Q. *Modélisation par forces surfaciques d'éoliennes à axe vertical*. 2015. i, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 26, 40
- [36] TECHNOLOGIE, A. *Up mini - Manuel d'utilisateur*. 2014. iii, 81, 83

