

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira-Bejaia

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin cycle

En vue de l'obtention du diplôme master II en électromécanique

Thème

Etude énergétique et réalisation d'une turbine éolienne à axe vertical de petite puissance

Réalisé par :

Mr. KACHEBI Youcef

Mr. HATEM Said

encadrée par :

Mr. D.AOUZELLAG

Mr. Y.MEBARKI

Promotion 2013

Remerciements

Avant tout, on remercie le bon dieu, le tout puissant de nous avoir donné la force nécessaire pour mener à terme ce travail.

Ensuite, nous voulons exprimer notre reconnaissance à nos promoteurs

Mr .Y.MEBARKI et Mr D.AOUZELLAG pour leur encadrement efficace, leur soutien et leur disponibilité. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nos vifs remerciements vont aussi à l'ensemble des employés de l'atelier Hall de Technologie pour leurs collaborations et leurs sympathies et de nous avoir ouvert les portes de l'atelier afin qu'on puisse effectuer notre projet d'étude.

On tient à remercier vivement les membres de nos familles qui nous ont toujours encouragée et soutenue.

On remercie, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, de même que ceux qui ont participé à notre formation, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Enfin, sans oublier on remercie les jurys qui nous feront l'honneur de juger ce travail.

HATEM Saïd

KACHEBI Youcef

Dédicaces

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

*A mes très chers parents en reconnaissance de leurs divers
Sacrifices, de leurs précieux conseils et de leur soutien moral.*

A mon cher frère et mes chères sœurs.

A toute la famille paternelle et maternelle.

A mes amis Koussi, Da Idir, l'équipe de chocs et sans oublier

Mon binôme S3id.

A ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration

De ce travail.

KACHEBI Youcef

Dédicaces

*À qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est
à mes très chers parents, dont le sacrifice, la
tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide
et les encouragements sont l'essence de ma
réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis
aujourd'hui.*

Je dédie ce travail également :

À mon frère Ayoub et ma sœur Salma

À toute ma famille

À mes chers amis (Koussi, Da Idir, Hafid, Zakari,

Hocine, Amine, Smail...)

À mon cher ami et binôme Youyou.

À tous ceux dont les noms m'ont échappé.

Said

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités

Introduction	2
I.1 Historique	2
I.2 L'énergie éolienne	3
I.3 Principaux composants d'une éolienne	4
I.4 Classification des éoliennes	7
I.4.1 Selon l'axe de rotation	7
I.4.1.1 Eolienne à axe horizontal	7
I.4.1.2 Eoliennes à axe vertical	8
I.4.2 Selon la puissance délivrée.....	11
I.4.2.1 Les petites éoliennes	11
I.4.2.2 Les grandes éoliennes	11
I.5 Domaines d'application de l'énergie éolienne.....	12
I.5.1 Pompage de l'eau.....	12
I.5.2 Production de l'électricité	12
I.5.2 Chauffage éolien.....	12
I.6 Le gisement éolien en Algérie	13
I.7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	15
I.7.1 machines asynchrones à cage d'écureuil	15
I.7.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)	16
I.7.3 Génératrices synchrones à rotor bobiné	17
I.7.4 Génératrices synchrones à aimant permanent (MSAP)	17
Conclusion	18

Chapitre II : Etude théorique et dimensionnement des organes

Introduction.....	19
II.1 Notions théoriques sur l'éolien.....	19
II.1.1 Loi de Betz.....	19
II.1.2 Forces aérodynamiques.....	20
II.1.2.1 Force de trainée.....	21
II.1.2.2 Force de portance.....	22
II.2 Dimensionnement des organes de l'éolienne.....	23
II.2.1 Dimensionnement de l'arbre.....	24
II.2.1.1 Etude en flexion.....	26
II.2.1.2 Etude en torsion.....	30
II.2.2 Dimensionnement du support.....	31
II.2.2.1 Barre horizontale.....	31
II.2.2.2 Barre verticale.....	38
II.3 Alternateur à griffes.....	42
II.3.1 Electricité dans l'automobile.....	42
II.3.2 Différents organes de l'alternateur à griffes.....	42
II.3.2.1 Stator des alternateurs à griffes.....	45
II.3.2.2 Rotor des alternateurs à griffes.....	46
II.3.2.3 Redresseur.....	48
II.3.2.4 Régulateur.....	49
II.3.2.5 Paliers.....	52
II.3.3 Principe de fonctionnement.....	53
II.3.4 Bilan de puissance.....	55
Conclusion.....	55

Chapitre III : Réalisation et dessin des organes

Introduction.....	56
III.1 Matériel utilisé.....	56
III.2 Réalisation.....	56
III.2.1 support	56
III.2.2 Pales.....	57
III.2.3 Arbre.....	59
III.2.4 Multiplicateur de vitesse.....	60
III.2.5 Paliers	61
III.2.6 Montage des roulements	62
Conclusion	65

Chapitre IV : Essais et expérimentations

Introduction.....	66
IV.1 Modifications sur l'alternateur.....	66
IV.2 Méthodes d'identification de l'alternateur.....	67
IV.3 Essais classiques des machines synchrones	68
IV.3.1 Essais de Glissement	68
IV.3.2 Essai en alternateur à vide	69
IV.3.3 Mesure en courant continu	71
IV.3.4 Essai en charge.....	73
Conclusion	75

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure I.2 : Tour d'une turbine	5
Figure I.3 : Rotor d'une turbine	5
Figure I.4 : Constitution d'une nacelle	6
Figure I.5 : Eoliennes à axe horizontal.....	8
Figure I.6 : Eoliennes à axe vertical (de gauche à droite): turbine Savonius, turbine Darrieus et Darrieus en H.....	9
Figure I.7 :Eolienne Savonius.....	10
Figure I.8 : Eoliennes Darrieus	10
Figure I.9 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie à 10m du sol [m/s]	14
Figure I.10 : Carte saisonnière de la vitesse du vent en Algérie [m/s].....	15
Figure I.11 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)	16
Figure I.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.	16
Figure I.13 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.....	18
Figure II.1 : Chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	19
Figure II.2 : Composante de la force du courant d'air transmise à l'objet	21
Figure II.3 : Effet du vent sur un corps creux.....	22
Figure II.4 : Rotor de Savonius.....	23
Figure II.5 : Composants de notre système éolien	24
Figure II.6 : Isolation de l'arbre	26
Figure II.7 : Isolation d'une partie de l'arbre	27
Figure II.8 : Isolation d'une partition de l'arbre	28
Figure II.9 : Diagramme des efforts tranchants	29
Figure II.10 : Diagramme des moments fléchissant	30
Figure II.11 : Isolation de la barre horizontale	32
Figure II.12 : Isolation d'une partie de la barre horizontale	33
Figure II.13 : Isolation d'une partition de la barre horizontale.....	34
Figure II.14 : Diagramme des efforts tranchants	35
Figure II.15 : Diagramme des moments fléchissant	35

Figure II.16 : Coupe de la barre creuse	36
Figure II.17 : Isolation de la barre verticale	38
Figure II.18 : Isolation d'une partition de la barre horizontale.....	39
Figure II.19 : Diagramme des efforts tranchants	40
Figure II.20 : Diagramme des moments fléchissant	41
Figure II.21 : Vue en coupe d'un alternateur à griffes	43
Figure II.22 : Vue éclatée d'un alternateur à griffes	43
Figure II.23 : Circuit électrique d'un alternateur auto	44
Figure II.24 : Stator de l'alternateur à griffes.....	45
Figure II.25 : Coupe du stator.....	45
Figure II.26 : Processus slinky, construction du stator en hélice.....	46
Figure II.27 : Marguerite, mise en forme du bobinage ondulé d'une phase	46
Figure II.28 : Insertion du bobinage d'une phase dans le paquet de tôles	46
Figure II.29 : Insertion des bobinages des autres phases.....	46
Figure II.30 : Caractéristique magnétique mesurée de l'acier rotor	47
Figure II.31 : Rotor de l'alternateur à griffes	47
Figure II.32 : Vue d'une griffe de l'alternateur	47
Figure II.33 : Vue de la bobine d'excitation et du noyau de l'alternateur	47
Figure II.34 : Redresseur de l'alternateur à griffes	48
Figure II.35 : Redressement de la tension fournie par l'alternateur.....	48
Figure II.36 : Courbe de v_1 , v_2 , v_3 et V_{ch} en fonction du temps.....	49
Figure II.37 : Régulateur de l'alternateur à griffes.....	50
Figure II.38 : Schéma du principe d'un régulateur électromagnétique.....	51
Figure II.39 : Schéma du principe du régulateur électronique	52
Figure II.40 : Paliers avant et arrière de l'alternateur à griffes.....	52
Figure II.41 : Ligne moyenne du flux inducteur sur un pas polaire.....	53
Figure II.42 : Trajets des flux magnétiques dans un alternateur à griffes	54
Figure II.43 : Coupe du rotor.....	54
Figure II.44 : Rotor munis d'aimants permanents entre griffes	54
Figure II.45 : Vue du bout d'une griffe	54
Figure II.46 : Bilan énergétique de l'alternateur à griffes.....	55
Figure III.1 : Support de l'éolienne	57
Figure III.2 : forme des pales	57
Figure III.3 : Fer plat en forme de demi-cercle	58

Figure III.4 : Tôle en acier inoxydable	58
Figure III.5 : Pale.....	59
Figure III.6 : support pour pales.	59
Figure III.7 : Schéma du multiplicateur de vitesse.....	61
Figure III.8 : Poulie montée sur la bague de fixation.....	61
Figure III.9 : Palier	62
Figure III.10 : Palier à roulement à rouleaux conique.	62
Figure III.11 : Palier à roulement à billes.	62
Figure III.12 : Arbre secondaire	63
Figure III.13 : Support pour les paliers.....	63
Figure III.14 : Support pour l'alternateur.....	64
Figure III.15 : Eolienne Savonius	64
Figure IV.1 : Bobines du stator en parallèle.....	67
Figure IV.2 : Bobines du stator en série	67
Figure IV.3 : Essais de glissement	68
Figure IV.4 : Caractéristique à vide	70
Figure IV.5 : Courbe $E_v = f(I_{ex})$	70
Figure IV.6 : Montage aval pour l'induit	71
Figure IV.7 : Montage amont pour l'inducteur.....	72
Figure IV.8 : Caractéristique $V_{ch} = f(I_{ch}, I_{ex}, \omega \text{ constantes})$	74
Figure IV.9 : Caractéristique $I_{ex} = f(I_{ch})$	75

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : Variation de la tension à vide en fonction du courant d'excitation.	70
Tableau IV.2 : Variation du courant en fonction de la tension de la phase 1.....	71
Tableau IV.3 : Variation du courant en fonction de la tension de la phase 2.....	72
Tableau IV.4 : Variation du courant en fonction de la tension de la phase 2.....	72
Tableau IV.5 : Variation du courant en fonction de la tension du rotor.	73
Tableau IV.6 : Mesure de l'inductance rotorique	73
Tableau IV.7 : Variation de la tension de charge en fonction du courant de charge.....	74
Tableau IV.8 : Variation du courant d'excitation en fonction du courant de charge.	74

Nomenclature

S : Surface active de la voilure de l'éolienne	[m ²]
P_v : Puissance de la masse d'air passant par une surface S	[W]
ρ : Masse volumique de l'air	[Kg/m ³]
V_v : Vitesse du vent	[m/s]
P_{max} : Puissance maximale, puissance de Betz	[W]
C_p^{opt} : Coefficient de puissance optimal	[-]
C_p : Coefficient de puissance de la voilure	[-]
λ : Vitesse réduite	[-]
R_r : Rayon du rotor	[m]
Ω : Vitesse de rotation	[rad/s]
S_{obj} : Surface caractéristique de l'objet	[m ²]
C_r : Coefficient de force aérodynamique	[-]
F_x : Force de trainée	[N]
C_x : Coefficient de trainée	[-]
F_y : Force de portance	[N]
C_y : Coefficient de portance	[-]
σ : Contrainte de flexion	[N/mm ²]
M_f : Moment de flexion	[N.mm]
I_0 : Moment quadratique polaire de l'arbre	[mm ⁴]
R : Rayon de l'arbre	[mm]

W_f : Module de flexion	$[mm^3]$
τ : Contrainte de torsion	$[N/mm^2]$
M_t : Moment de torsion	$[N.mm]$
W_t : Module de torsion	$[mm^3]$
M_i : Moment idéal de flexion	$[N.mm]$
I_{Gz} : Moment quadratique de l'arbre	$[mm^4]$
$\sigma_{\acute{e}q}$: Contrainte équivalente	$[N/mm^3]$
d : Diamètre de l'arbre	$[mm]$
σ_{adm} : Contrainte admissible par le matériau	$[N/mm^3]$
C_r : Couple résistant créé par la poulie	$[N.m]$
L : Longueur de l'arbre	$[m]$
F_v : Force du vent	$[N]$
P : Puissance nominale débitée par l'alternateur	$[W]$
U : Tension nominale débitée par l'alternateur	$[V]$
I : Courant nominal débité par l'alternateur	$[A]$
ω_a : Vitesse de rotation de l'arbre	$[rad/s]$
V_v : Vitesse du vent	$[m/s]$
L_h : Longueur de la barre horizontale	$[m]$
σ_{max} : Contrainte maximale de flexion calculée	$[N/mm^2]$
I_{GZ} : Moment quadratique	$[m^4]$
H : Hauteur de la barre creuse	$[m]$

\vec{R}_A : Réaction au point A	[N]
\vec{R}_x et \vec{R}_y : Réactions d'encastrement selon l'axe (OX) et (OY) respectivement	[N]
\vec{M}_e : Moment d'encastrement	[N.m]
L_v : Longueur de la barre verticale	[m]
v : Valeur efficace d'une tension simple du réseau alimentant le redresseur	[V]
ω : Pulsation des courants statorique	[rad/s]
t : Temps	[s]
θ : Déphasage	[rad]
E : F.é.m. induite	[V]
B : Induction magnétique	[T]
n : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)	[-]
f : Fréquence du courant statorique	[Hz]
S_{cr} : Section du circuit magnétique	[Cm ²]
r : Rapport de multiplication de vitesse	[-]
r_m : Rapport de multiplication modifié	[-]
R_s : Résistance d'une phase du stator	[Ω]
L_d : Inductance statorique longitudinale	[H]
L_q : Inductance statorique transversale	[H]
R_r : Résistance du rotor	[Ω]
L_f : Inductance du rotor	[H]
M_f : Mutuelle inductance stator/inducteur	[H]

N_s : Vitesse du synchronisme	[tr/min]
E_v : Tension à vide	[V]
I_{ex} : Courant d'excitation	[A]
K_v : Pente de la partie linéaire de la caractéristique à vide	[-]
Z_r : Impédance du rotor	[Ω]
I_{ch} : Courant de la charge	[A]
V_{ch} : Tension de la charge	[A]

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées.

Parmi elles, nous pouvons citer les énergies renouvelables, qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre [1].

Par définition, l'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Cette énergie mécanique est exploitée à des éoliennes, hélices installées au sommet de pylônes et qui tournent sous l'action du vent. La rotation des hélices actionne un système produisant de l'électricité.

L'éolienne, que l'on nomme aussi aérogénérateur, est une machine qui permet la transformation de l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité. Lorsque l'on ne produit qu'une force mécanique pour actionner une pompe, on parlera seulement d'éolienne; par contre lorsque l'on produit de l'électricité, on parlera d'aérogénérateur [2].

Au cours du premier chapitre, nous allons présenter quelques généralités sur l'énergie éolienne, et on donnera un bref aperçu sur les aérogénérateurs.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique et le dimensionnement des organes de notre turbine éolienne.

Le troisième chapitre nous donne les différentes étapes suivies pour la réalisation de notre éolienne, et nous allons présenter les dessins réalisés avec le logiciel AUTOCAD.

Le quatrième chapitre donne les résultats de l'identification de l'alternateur ainsi que les résultats des tests effectués sur l'aérogénérateur.

Chapitre I

Généralités

Introduction

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. En effet, elle est en développement permanent et continu, et a pu intégrer dans différents domaines, elle est devenue même concurrentielle à d'autres formes d'énergies classiques.

Néanmoins, quelques exigences sont à respecter pour mieux exploiter l'énergie éolienne. Pour cela des aperçus sur l'éolienne, le choix de site et la météorologie sont utiles.

I.1 Historique

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en perse, en Irak, en Égypte et en Chine. Hammourabi, roi de Babylone avait conçu, paraît-il, dix-sept siècles avant Jésus-Christ, le projet d'irriguer la riche plaine de Mésopotamie à l'aide de l'énergie éolienne. Les moulins utilisés à l'époque dans cette région étaient vraisemblablement à axe vertical et sans doute analogues à ceux dont les ruines subsistent sur le plateau iranien. Trois siècles avant Jésus-Christ, l'égyptien Héro d'Alexandrie représente dans une étude consacrée à la pneumatique, un moulin à axe horizontal à quatre pales qui alimente en air comprimé un orgue. Faut-il en déduire que ceux-ci étaient très répandus en Égypte ? Il est difficile de le dire. On peut toutefois affirmer, sans crainte d'être démenti, que la partie orientale du bassin méditerranéen constitue avec la chine, où seules les machines à axe vertical étaient connues, le berceau des aéromoteurs [1].

Les moulins à vent sont apparus en Europe un peu avant l'an 1000 en Grande-Bretagne, et se sont généralisés ensuite au douzième siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical.

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du dix-neuvième siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush qui conçoit ce dispositif en premier pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. L'éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite. Par la suite, le dispositif éolien de Charles F. Bush est repris par le danois Poul La Cour qui dessine plusieurs éoliennes industrielles dont une qui sera vendue en 72 exemplaires au début du vingtième siècle. Ces éoliennes visaient à produire de l'hydrogène en utilisant la force du vent pour la convertir en énergie chimique par un processus d'électrolyse [2].

C'est au début du vingtième siècle qu'apparaissent les premières éoliennes créant de grandes quantités d'électricité. Il y a eu alors trois grandes nouvelles innovations :

- Il y a eu tout d'abord un prototype soviétique en 1931 d'une puissance de 10 kW avec un rotor de diamètre 30 mètres.
- La conception dans les années vingt du rotor Darrieus à axe vertical.
- En 1957, l'éolienne de Gedser produisant une puissance de 200 kW.

En 1973, les pays arabes exportateurs de pétrole réduisent leurs exportations. Les pays industrialisés comprennent leur dépendance vis-à-vis du pétrole et essaient de garantir une sécurité d'approvisionnement énergétique. La crise pétrolière en 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.

Certains pays se lancent donc dans l'énergie éolienne tel que le Danemark qui ne voulait pas tenter le nucléaire. Des programmes nationaux ont été lancés ces dernières années dans des pays européens (Allemagne, Espagne, Danemark, France...), dans le but d'améliorer l'éolien et son utilisation dans la production d'électricité.

Le développement dans les dernières années de nouveaux modèles d'éoliennes a relancé le marché de l'éolienne qui était resté assez latent. Le rythme de développement des éoliennes n'a alors cessé d'augmenter [3].

I.2 L'énergie éolienne

La ressource éolienne (le vent), provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [4].

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (voir figure I.1).

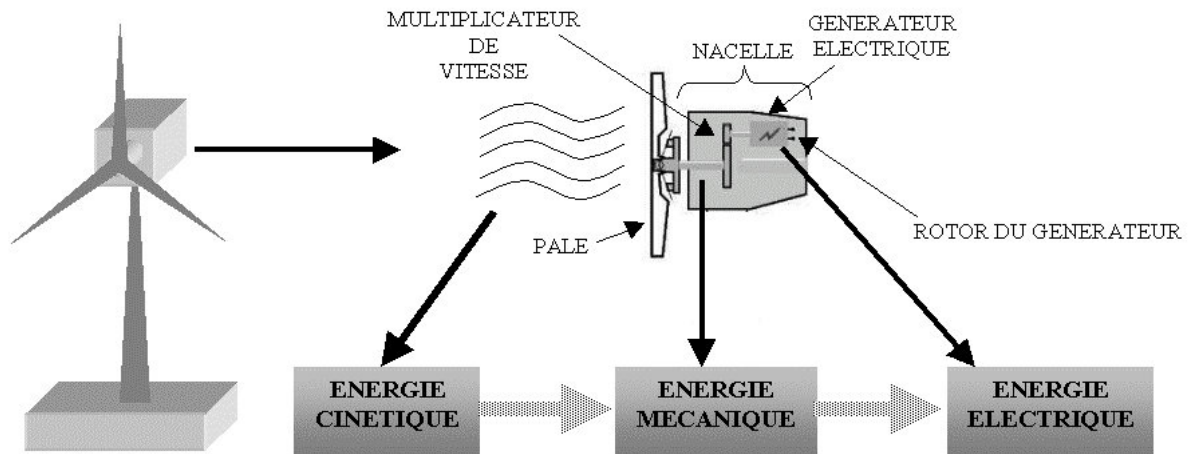


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver, et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [5].

I.3 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :

- **Un mât**

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées C'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres,

maisons... Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [6].



Figure I.2 : Tour d'une turbine

- **Un rotor**

Il est Composé de plusieurs pales et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et /ou fibre de carbone. Leur longueur atteint actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor.



Figure I.3: Rotor d'une turbine

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

- **Une nacelle**

Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

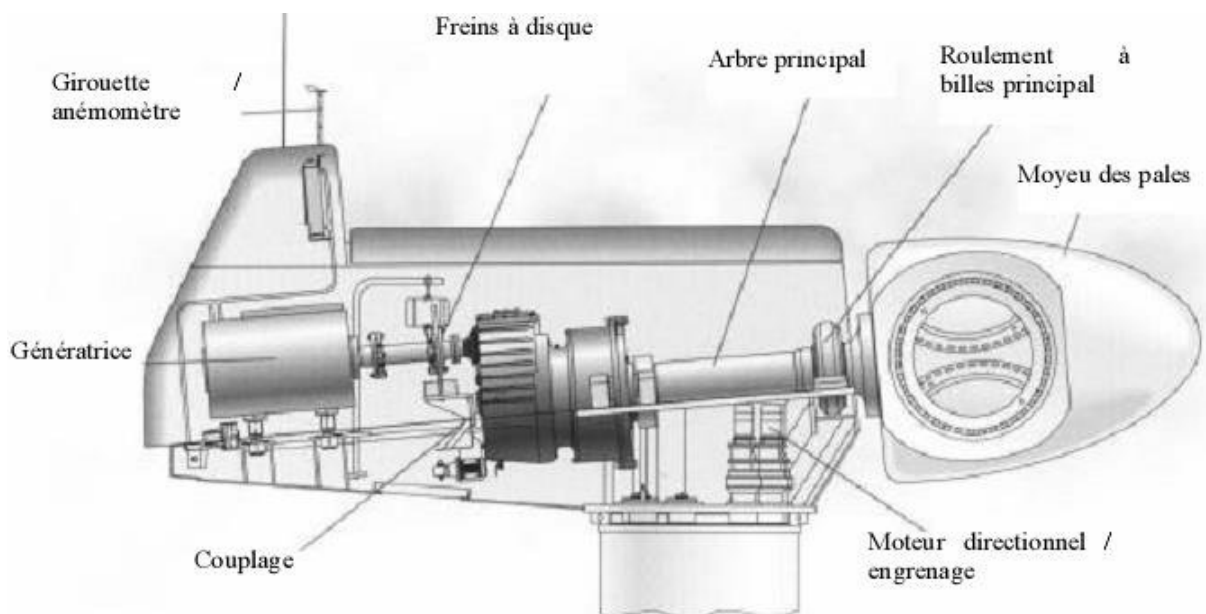


Figure I.4 : Constitution d'une nacelle

Les différents composants d'une nacelle :

- ❖ Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- ❖ L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ❖ La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

- ❖ Un contrôleur électronique : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.
- ❖ Divers dispositifs de refroidissement: le refroidissement de la génératrice et du multiplicateur se fait par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.
- ❖ Grâce à un système de supervision et contrôle, l'éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.
- ❖ dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite [7].

I.4 Classification des éoliennes

I.4.1 Selon l'axe de rotation

I.4.1.1 Eolienne à axe horizontal [6]

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les

plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW.



Figure I.5 : Eoliennes à axe horizontal

I.4.1.2 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont très peu mises en jeu de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre la machinerie au sol (accès plus facile à la génératrice et au multiplicateur) mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des vents proches du sol, moins forts qu'en hauteur car ils sont freinés par le relief. De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre ce type d'éoliennes ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. En ce qui concerne leurs implantations, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur sur un site agricole par exemple [8].

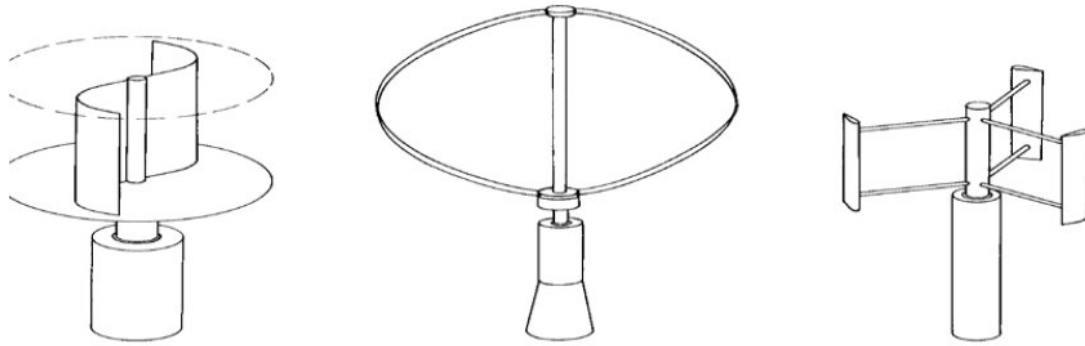


Figure I.6 : Eoliennes à axe vertical (de gauche à droite): turbine Savonius, turbine Darrieus et Darrieus en H

I.4.1.2.1 Eoliennes Savonius

C'est le modèle idéal pour les débutants. C'est presque impossible de faire plus simple et moins cher à réaliser. Une des applications les plus connues est d'ordre publicitaire. Il s'agit des fameux panneaux en tôle qui tournent sur eux-mêmes. On entend souvent dire que ce type d'éolienne n'est pas adapté à la production de courant. C'est à la fois vrai et faux. Des modèles commerciaux de conception récente s'avèrent être très productifs, ainsi que de nombreux modèles réalisés par des amateurs éclairés. Cela vaut vraiment le coup de se pencher sur cette conception, car elle possède de gros avantages. Elle démarre avec des vents très faibles, elle résiste bien aux vents violents, elle possède un bon couple et elle est peu bruyante. Son seul défaut est que sa vitesse est limitée, ce qui ne veut pas dire pour autant qu'il faille l'abandonner. De nombreux bricoleurs chevronnés ont contourné le problème de lenteur par l'allongement des pales et une bonne démultiplication. Certes, on a plus l'habitude de trouver ce type d'éolienne pour le pompage de l'eau, qui est un domaine où elle excelle. Mais les choses sont en train d'évoluer grâce au progrès de l'aérodynamisme et à la passion de certains auto constructeurs. Pour se faire la main sur une première construction, c'est vraiment le modèle qu'il faut choisir [9].

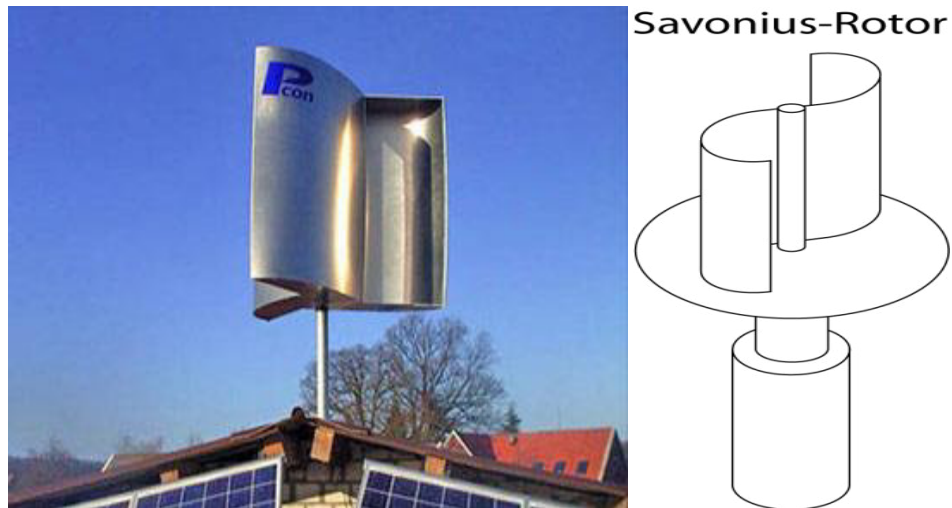


Figure I.7: Eolienne Savonius

I.4.1.2.2 Eolienne Darrieus

Les éoliennes de ce type ont été inventées par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935, Le rotor de Darrieus fonctionne grâce à la portance et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro, ce qui implique qu'une petite turbine Savonius est très souvent présente sur son axe pour rendre possible le démarrage [4].

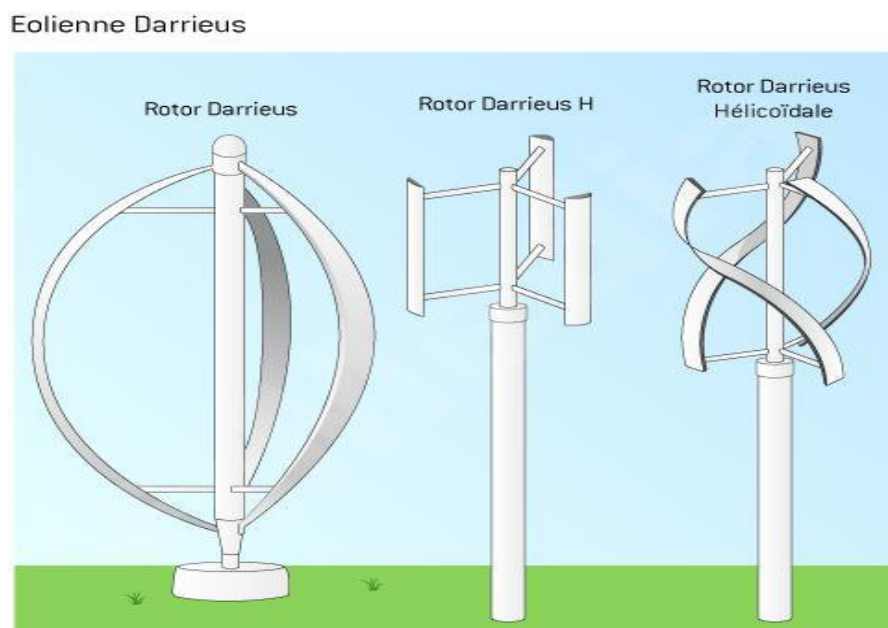


Figure I.8 : Eoliennes Darrieus

I.4.2 Selon la puissance délivrée

I.4.2.1 Les petites éoliennes

Le petit éolien, aussi appelé éolien domestique, pour particuliers ou individuel désigne les machines de petite et moyenne puissance.

Ces machines sont en général utilisées pour produire de l'électricité consommée sur place (autonomes en site isolé) et/ou revendue à un réseau de distribution. On trouve principalement ces installations en milieu rural, mais peuvent être aussi utilisées en milieu urbain, une petite éolienne peut aussi être utilisée pour garantir l'autonomie énergétique d'un voilier.

Le terme générique "petit éolien" détermine la classe énergétique d'un aérogénérateur. Les « petites éoliennes » ne sont pas nécessairement petites en taille. La dimension des pales et de la nacelle d'une machine est facteur de la puissance de la génératrice. Le diamètre des pales peut aller de 1 mètre à plus de 10 mètres et peser de quelques kilos à plusieurs centaines de kilos.

D'après la dénomination internationale, il s'agit d'éoliennes qui ont une surface balayée inférieure à 200 m² et une puissance nominale comprise entre 1 kW et 100 kW.

Les premiers aérogénérateurs de la classe « petit éolien », existent en Europe depuis 1881 et ont été produits industriellement aux États-Unis et en Australie dès les années 1920 (la société Jacobs en avait vendu 20 000 en 1950).

I.4.2.2 Les grandes éoliennes

Les grandes éoliennes connaissent un développement important dans de nombreux pays industrialisés depuis quelques années. L'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'électricité sur une grande échelle a véritablement commencé au début des années 80, avec l'implantation de fermes éoliennes en Allemagne et en Californie. Cependant, ce projet, un peu prématuré, n'avait pas produit les résultats escomptés. L'industrie de l'éolienne n'en était qu'à ses débuts. Ce n'est qu'au début des années 90 que l'industrie de l'éolienne a véritablement décollé à un niveau mondial. Dans les pays d'Europe du nord (Danemark, Allemagne), des constructeurs en tirer profit de la demande très forte de leur marché domestique.

La plupart des grandes éoliennes modernes sont à axe horizontal. Leur allure élancée, presque frêle, démontre la résistance des matériaux modernes. Les dimensions sont beaucoup

plus considérables qu'on ne l'imagine : la tour a 45 mètres de hauteur, mais le diamètre de l'hélice (ou rotor) atteignant presque la même taille, fait culminer l'ensemble à près de 60 mètres [13].

I.5 Domaines d'application de l'énergie éolienne

I.5.1 Pompage de l'eau

L'utilisation de l'énergie du vent pour le pompage de l'eau est très répandue. Les problèmes qui se posent à l'ingénieur dans ce domaine sont multiples. Il s'agit de déterminer le type d'éolienne et de pompe à installer, leurs dimensions et leurs caractéristiques et le volume du réservoir de régulation pour que les besoins en eau potable ou en eau d'irrigation soient satisfaits dans les meilleures conditions.

Le choix à effectuer et les caractéristiques des installations dépendent évidemment du régime des vents mais aussi des possibilités du point d'eau à équiper.

En pratique, on aura intérêt à procéder d'abord à un essai de pompage sur le point d'eau. On évaluera ensuite l'énergie nécessaire à l'exhaure de l'eau avant de déterminer le diamètre de l'éolienne et arrêter un choix quant au type de machine à installer [1].

I.5.2 Production de l'électricité

L'énergie électrique peut être produite par différentes ressources, parmi celles-ci on cite une énergie durable qui est l'énergie éolienne. Cette dernière a beaucoup progressé en termes de développement technologique et exploitation ces dernières années.

Dans les régions ventées du globe, la production d'électricité à l'aide d'éoliennes peut s'avérer économique. Elle est notamment intéressante pour les communautés isolées.

I.5.2 Chauffage éolien

Parmi les besoins énergétiques susceptibles d'être satisfaits par l'emploi des éoliennes, le chauffage des locaux est sans doute celui qui coïncide le mieux avec la disponibilité en énergie éolienne. La bonne corrélation entre divers paramètres éoliens et climatiques va nous montrer l'intérêt que présente l'énergie éolienne pour le chauffage. En effet, Il est bien connu que le vent souffle plus fréquemment en hivers qu'en été. Les besoins en chauffage coïncident donc, en toute première approximation, avec la variation saisonnière d'énergie que nous offre

le vent. Cela semble donc un atout important pour le chauffage éolien, contrairement au solaire direct qui décroît lorsqu'on augmente les besoins de chauffage [10].

I.6 Le gisement éolien en Algérie

L'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent.

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes: Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

- **Estimation des ressources éoliennes**

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent, a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers l'Algérie. La carte représentée à la figure I.9, montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au sud.

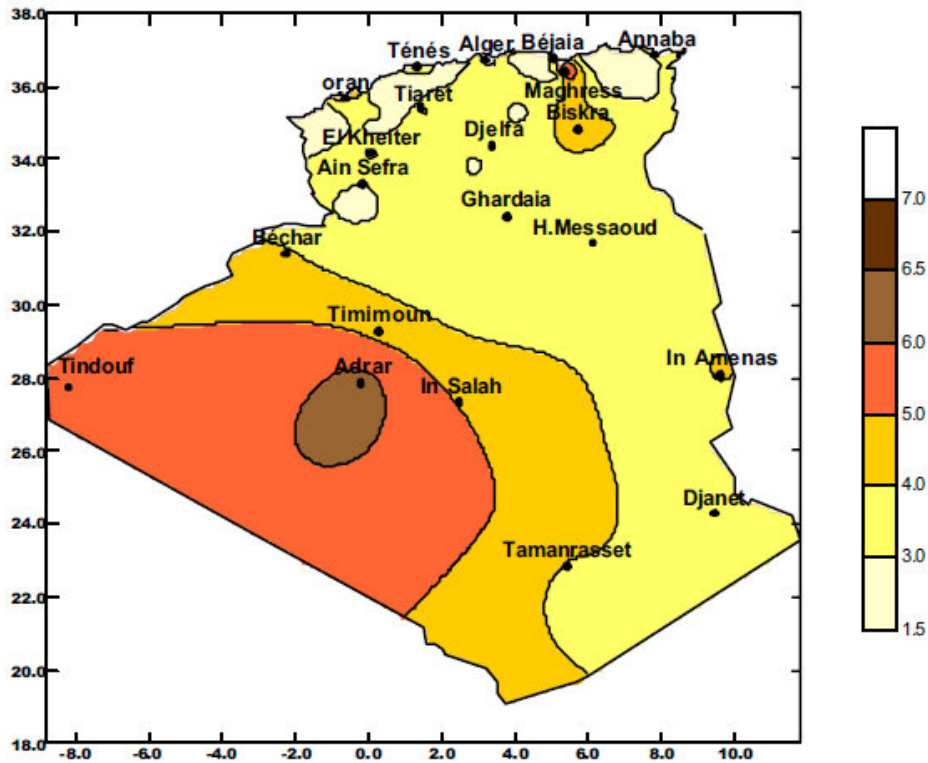


Figure I.9 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie à 10m du sol [m/s]

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Les cartes saisonnières représentées en figure I.10 montrent clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventées que le reste des saisons, et que le printemps en est la plus ventée. Néanmoins, on remarque que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, des régions telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisées par une vitesse relativement constante tout au long de l'année.

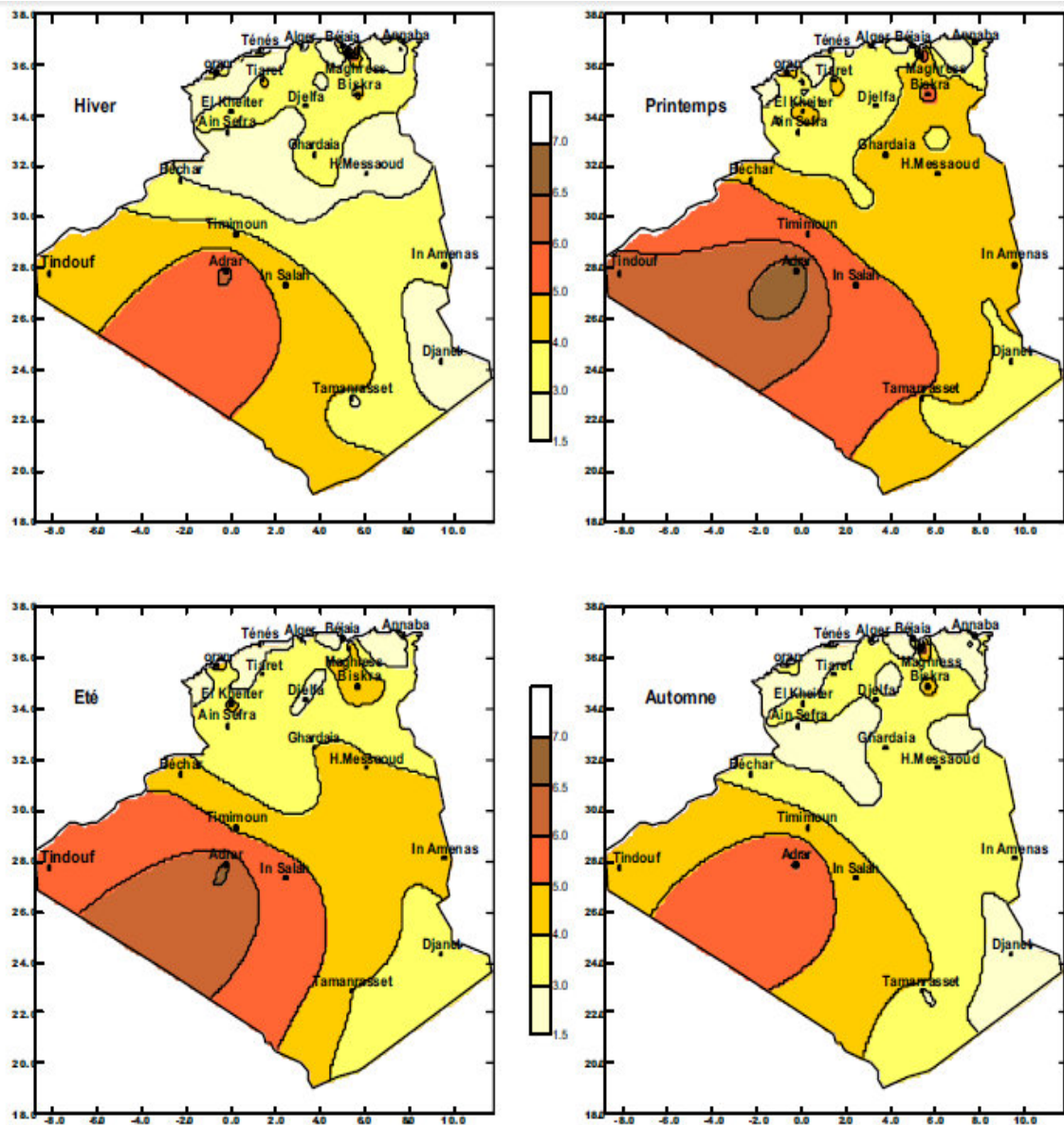


Figure I.10 : Carte saisonnière de la vitesse du vent en Algérie [m/s]

I.7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

I.7.1 machines asynchrones à cage d'écureuil [4]

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une

très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (figure 1.12). La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique comme le montre la figure (1.11). Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible.

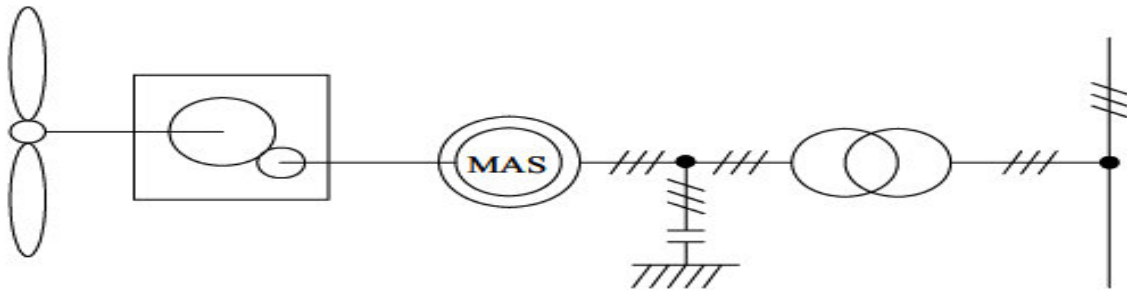


Figure I.11 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)

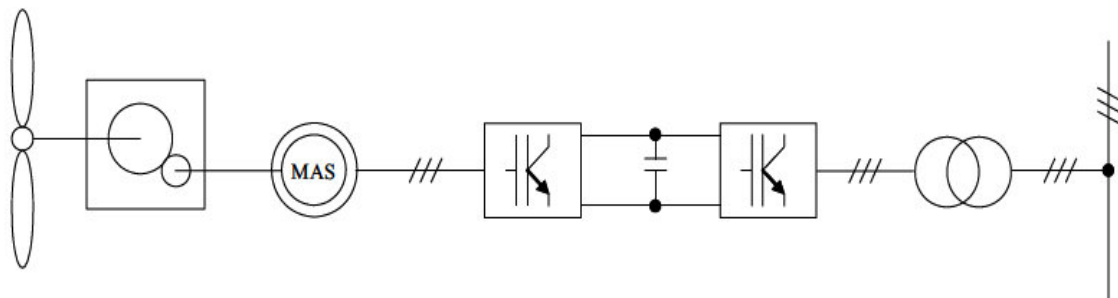


Figure I.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

I.7.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)[11]

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Ces machines sont un peu plus complexes que les machines

asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines.

I.7.3 Génératrices synchrones à rotor bobiné

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes, Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante [4].

Ce type de génératrice utilise des moteurs auxiliaires appelés excitatrice pour l'excitation du rotor associée à un redresseur tournant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse, on utilise un rotor cylindrique massif. Mais il est possible de s'affranchir de l'application à grande vitesse en utilisant une machine synchrone à aimant permanent basses vitesses à grand nombre de paires de pôles [12].

I.7.4 Génératrices synchrones à aimant permanent (MSAP) [4]

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants (figure 1.13). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles. La présence obligatoire de

l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

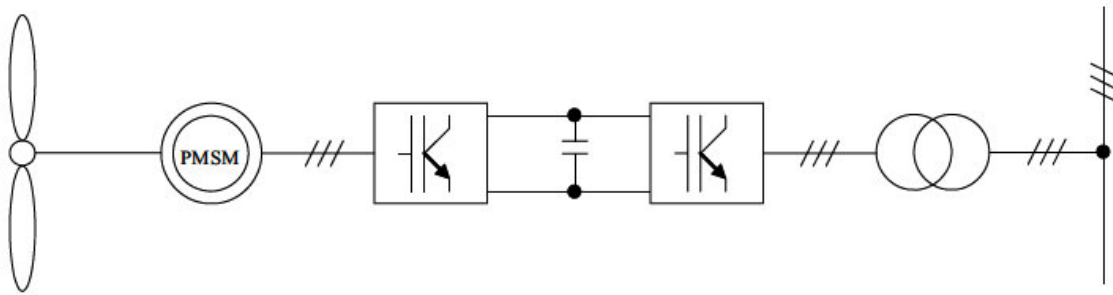


Figure I.13 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini l'énergie éolienne et les types d'aérogénérateurs qui existent dans le milieu industriel. Notre travail se consacrera sur l'étude théorique et pratique (réalisation) d'une éolienne à axe vertical de type Savonius.

Chapitre II
Etude théorique
et
dimensionnement
des organes

Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons faire une étude théorique mécanique et électrique de notre système éolien, la partie mécanique comporte une étude aérodynamique ainsi qu'une étude de résistance des matériaux pour dimensionner nos équipements mécaniques de manière à résister aux sollicitations et aux contraintes auxquelles ils sont soumis, la partie électrique comporte une présentation de l'alternateur à griffes que nous allons utiliser pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique ainsi que ses différents organes et son principe de fonctionnement.

Le schéma suivant représente notre chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique :



Figure II.1:Chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

II.1 Notions théoriques sur l'éolien

II.1.1 Loi de Betz

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par:

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_v^3 \quad (\text{II-1})$$

Avec :

P_v : La Puissance de la masse d'air passant par une surface S [W]

ρ : Masse volumique de l'air [Kg/m^3]

S : Surface active de la voilure de l'éolienne [m^2]

V_v : Vitesse du vent [m/s]

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \times P_v = 0,59 \times P_v \quad (\text{II-2})$$

Avec :

P_{max} : Puissance maximale, puissance de Betz [W]

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{2 \times P_{max}}{\rho \times S \times V_v^3} = 0,59 \quad (\text{II-3})$$

Avec :

C_p^{opt} : Coefficient de puissance optimal [-]

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient est lié à la puissance de l'éolienne et à la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{2 \times P_{eol}}{\rho \times S \times V_v^3} \quad (\text{II-4})$$

C_p : Coefficient de puissance de la voilure [-]

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite λ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R_r \times \Omega}{V_v} \quad (\text{II-5})$$

Avec :

λ : Vitesse réduite [-]

R_r : Rayon du rotor [m]

Ω : Vitesse de rotation [rad/s]

II.1.2 Forces aérodynamiques

Un objet dans un courant d'air connaît une force qui est transmise du courant d'air à l'objet, son expression est :

$$F = \frac{1}{2} \times C_r \times \rho \times V_v^2 \times S_{obj} \quad (\text{II-6})$$

Avec :

S_{obj} : La surface caractéristique de l'objet [m²]

Cr : Coefficient de force aérodynamique [-]

Cette force peut être considérée comme la résultante de deux composantes de force agissant dans deux directions perpendiculaires. Ces deux composantes sont appelées force de portance et force de trainée. Les amplitudes de ces deux forces dépendent de la forme de l'objet, sa position par rapport à la direction du courant d'air, la direction et la vitesse du courant d'air.

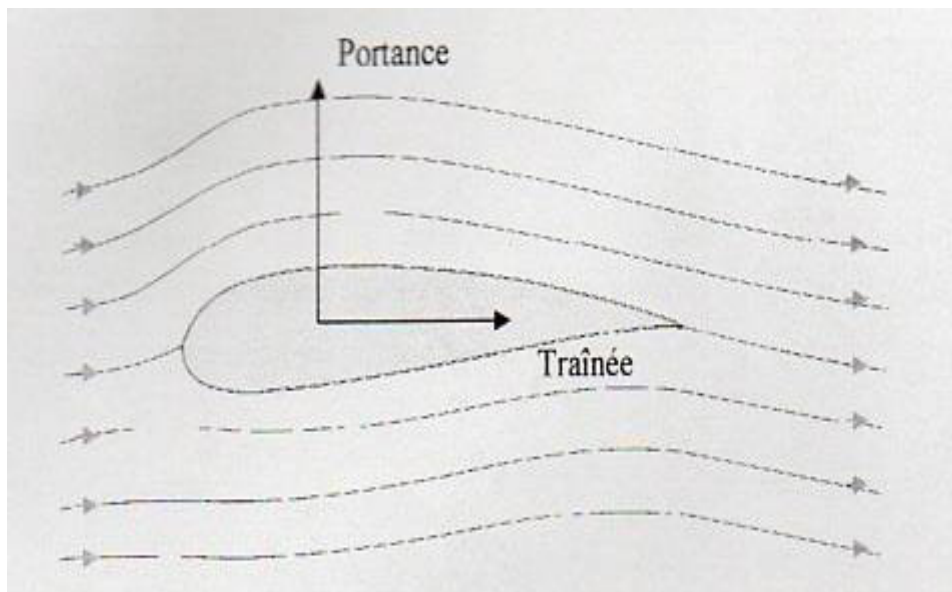


Figure II.2 : Composante de la force du courant d'air transmise à l'objet

II.1.2.1 Force de trainée

En aérodynamique la trainée correspond à la résistance d'air, celle-ci augmente avec la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air. La trainée est une force qui agit sur l'objet dans la même direction que le vent. Son expression est :

$$F_x = \frac{1}{2} \times C_x \times \rho \times V_v^2 \times S \quad (\text{II-7})$$

Avec :

F_x : Force de trainée [N]

C_x : Coefficient de trainée [-]

II.1.2.2 Force de portance

La portance est la force qui permet à un aéronef de s'élever en altitude. La portance aérodynamique est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement.

Son expression est :

$$F_y = \frac{1}{2} \times C_y \times \rho \times V_v^2 \times S \quad (\text{II-8})$$

Avec :

F_y : Force de portance [N]

C_y : Coefficient de portance [-]

Dans notre projet, nous allons étudier l'éolienne à axe vertical de type Savonius. La mise en mouvement de ce type d'éoliennes est identique à celui d'un anémomètre, en effet, les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différentes, il en résulte donc un couple moteur que l'on peut utiliser pour entrainer un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

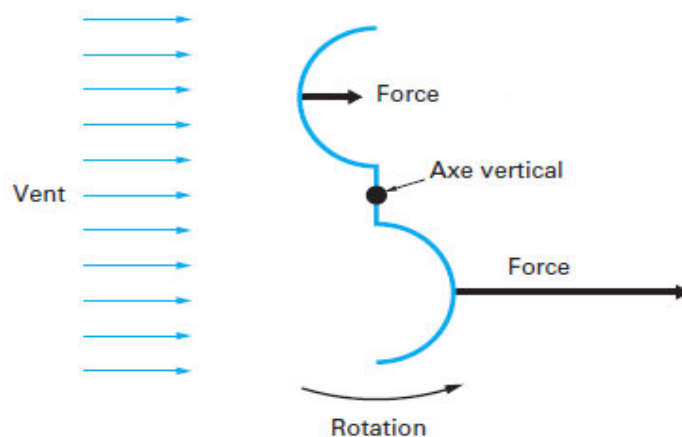


Figure II.3 : Effet du vent sur un corps creux

Le fonctionnement du rotor Savonius est amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres à travers un espace qui est égale à 1/6 du rotor de l'éolienne, ce qui augmente le couple moteur (figure II.4). On peut aisément imaginer que, lors du démarrage de ce type de machine (phase d'établissement du vent), les cylindres soient orientés par rapport au vent de telle manière que le couple résultant

soit nul. L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle l'un par rapport à l'autre, permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome.

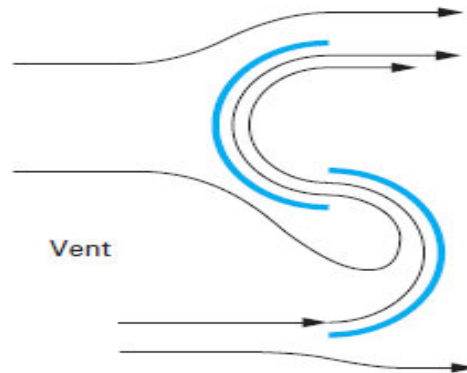
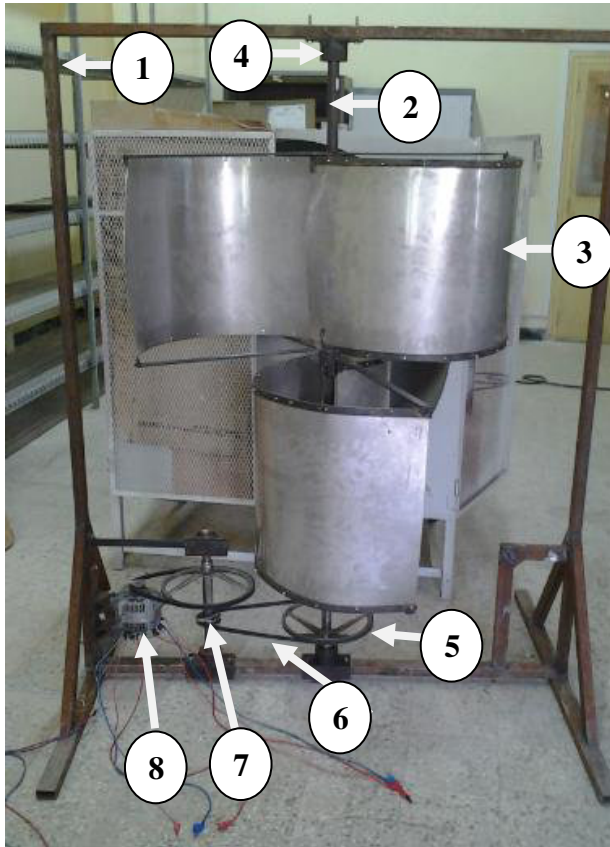


Figure II.4: Rotor de Savonius

II.2 Dimensionnement des organes de l'éolienne

Pour dimensionner les organes de l'éolienne, une étude de résistance des matériaux est nécessaire pour déterminer les contraintes auxquelles ils sont soumis, ensuite en fonction des efforts appliqués et de la nature du matériau utilisé, on déterminera les formes et les dimensions du solide pour qu'il puisse résister aux contraintes appliquées.

La figure ci-dessous nous montre notre système éolien et les organes qui le composent :



1. Support
2. Arbre
3. Pale
4. Palier à roulement
5. Poulie
6. Courroie
7. Multiplicateur de vitesse
8. Alternateur

Figure II.5 : Composants de notre système éolien

II.2.1 Dimensionnement de l'arbre

Lorsque le vent s'applique sur les voilures de l'éolienne, une force se crée dans la même direction du vent qui tend à fléchir l'arbre de rotation.

Lorsque l'arbre tourne, la poulie crée un couple résistant qui tend à le freiner, donc il y'aura une contrainte de torsion sur l'arbre de rotation.

Nous concluons que l'arbre est soumis à des sollicitations composées de flexion et de torsion.

Dans le cas d'une structure soumise à une sollicitation composée de flexion et de torsion, le moment idéal de flexion (M_i) permet de faire les calculs de résistance comme si la structure était uniquement sollicitée en flexion.

Détermination de M_i :

❖ Pour la flexion :

$$\sigma = \frac{M_f}{W_f} \quad \text{Et} \quad W_f = \frac{I_0}{R} ; \quad I_0 = \frac{R \times \pi \times d^3}{32}$$

Avec :

σ : Contrainte de flexion [N/mm^2]

M_f : Moment de flexion [$N \cdot mm$]

I_0 : Moment quadratique polaire de l'arbre [mm^4]

R : Rayon de l'arbre [mm]

W_f : Module de flexion [mm^3]

❖ Pour la torsion : $\tau = \frac{M_t}{W_t}$

Avec :

$$W_t = 2 \times W_f \quad ; \quad \text{Car : } I_0 = 2 \times I_{Gz}$$

Et : $\sigma_{\acute{e}q} = \frac{M_i}{W_f}$

Avec :

τ : Contrainte de torsion [N/mm^2]

M_t : Moment de torsion [$N \cdot mm$]

W_t : Module de torsion [mm^3]

M_i : Moment idéal de flexion [$N \cdot mm$]

I_{Gz} : Moment quadratique de l'arbre [mm^4]

$\sigma_{\acute{e}q}$: Contrainte équivalente [N/mm^2]

D'après le critère de Von Mises nous avons :

$$\sigma_{\acute{e}q} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \times \tau^2}$$

En remplaçant dans le critère de Von Mises $\sigma_{\acute{e}q}$, σ et τ , on obtient :

$$\frac{M_i}{W_f} = \sqrt{\left(\frac{M_f}{W_f}\right)^2 + 3\left(\frac{M_t}{2 \times W_f}\right)^2} \quad (\text{II-9})$$

Et nous trouvons :

$$M_i = \sqrt{M_f^2 + 0,75 \times M_t^2} \quad (\text{II-10})$$

Dans notre cas nous voulons déterminer le diamètre de l'arbre, soit :

$$\sigma_{\acute{e}q} = \frac{M_i}{W_f} \leq \sigma_{adm} \quad (\text{II-11})$$

Avec :

$$W_f = \frac{\pi \times d^3}{32}$$

Et donc :

$$\sigma_{adm} \geq \frac{32 \times M_i}{\pi \times d^3} \quad (\text{II-12})$$

Avec :

d : Diamètre de l'arbre [mm]

σ_{adm} : Contrainte admissible par le matériau [N/mm^2]

Dans ce cas nous obtenons :

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32}{\pi} \times \frac{M_i}{\sigma_{adm}}} \approx 2.17 \times \sqrt[3]{\frac{M_i}{\sigma_{adm}}} \quad (\text{II-13})$$

II.2.1.1 Etude en flexion

On isole l'arbre et on représente les forces qui agissent sur lui :

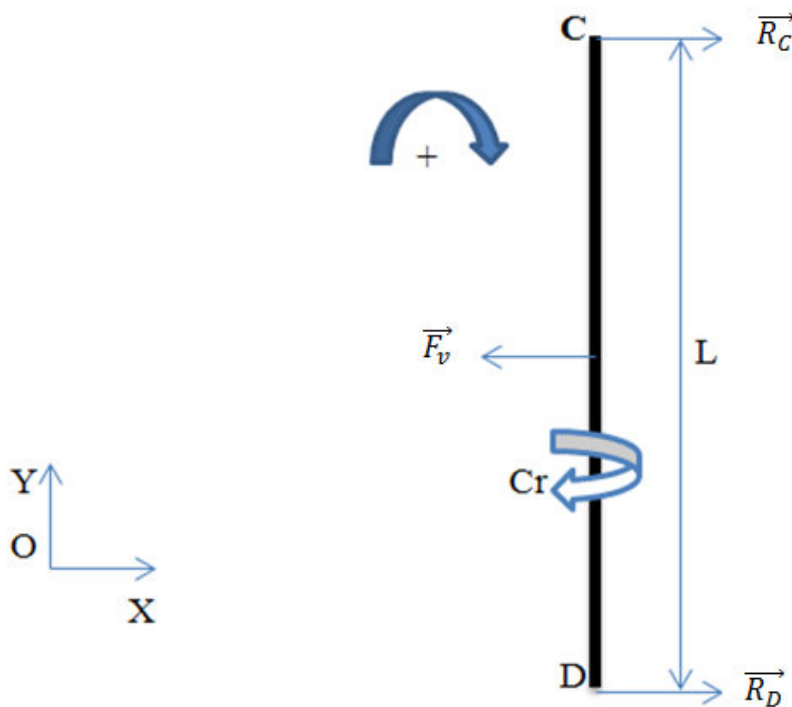


Figure II.6 : Isolation de l'arbre

Avec :

R_C et R_D , les réactions aux points C et D respectivement [N]

C_r : Le couple résistant créé par la poulie [$N.m$]

L : Longueur de l'arbre [m]

F_v : Force du vent [N]

En appliquant le principe fondamental de la statique on trouve :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (\text{II-14})$$

$$\sum \vec{M} = \vec{0} \quad (\text{II-15})$$

En projetant les forces sur l'axe (OX) on aura :

$$R_C + R_D - F_v = 0 \quad (\text{II-16})$$

D'après l'équation (II-15) on aura :

$$R_C \times L - F_v \times \frac{L}{2} = 0$$

Ce qui donne :

$$R_C = \frac{F_v}{2} \quad (\text{II-17})$$

On remplace (II-17) dans (II-16) on trouve :

$$R_D = \frac{F_v}{2} \quad (\text{II-18})$$

Détermination des diagrammes des efforts tranchants (T) et des moments fléchissant (M_f) :

- Pour : $0 < X < a$:

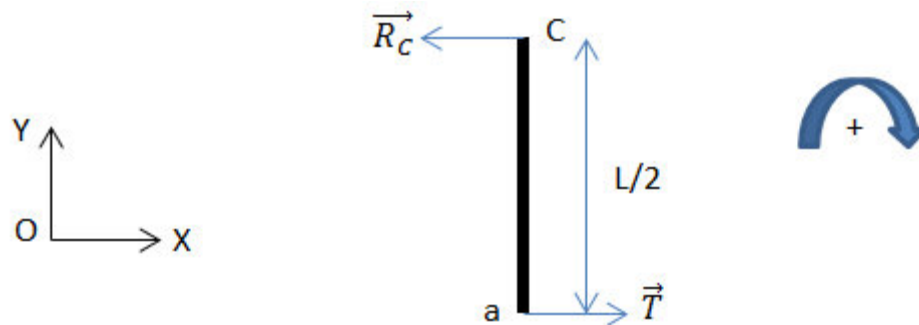


Figure II.7 : Isolation d'une partie de l'arbre

On applique le principe fondamental de la statique on trouve :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (\text{II-19})$$

$$\sum \vec{M} = \vec{0} \quad (\text{II-20})$$

En projetant les forces sur l'axe (OX) :

$$R_C = T \Rightarrow T = \frac{F_v}{2}$$

De l'équation (II-7) on aura :

$$M_f = R_C \times X \Rightarrow M_f = \frac{F_v \times X}{2}$$

❖ Pour : $X = 0 \Rightarrow M_f = 0$

❖ Pour : $X = \frac{L}{2} \Rightarrow M_f = \frac{F_v \times L}{4}$

• Pour : $a < X < L$:

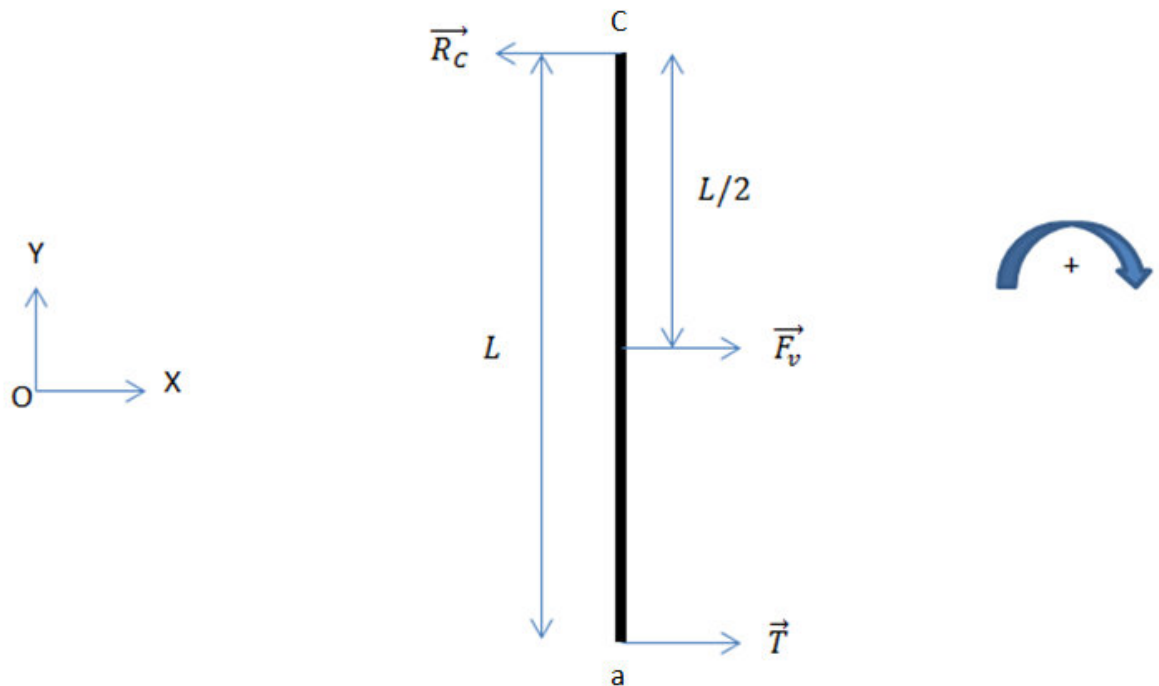


Figure II.8 : Isolation d'une partition de l'arbre

On applique le principe fondamental de la statique :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (\text{II-21})$$

$$\sum \vec{M} = \vec{0} \quad (\text{II-22})$$

On projette les forces sur l'axe (OX) :

$$F_v - R_C + T = 0$$

$$R_C = \frac{F_v}{2} \Rightarrow T = -\frac{F_v}{2}$$

De l'équation (II-9) on aura :

$$F_v \left(X - \frac{L}{2} \right) - R_C \times X + M_f = 0$$

D'où :

$$M_f = \frac{F_v}{2} \times X - F_v \left(X - \frac{L}{2} \right)$$

- ❖ Pour : $X = \frac{L}{2} \Rightarrow M_f = \frac{F_v \times L}{4}$
- ❖ Pour : $X = L \Rightarrow M_f = 0$

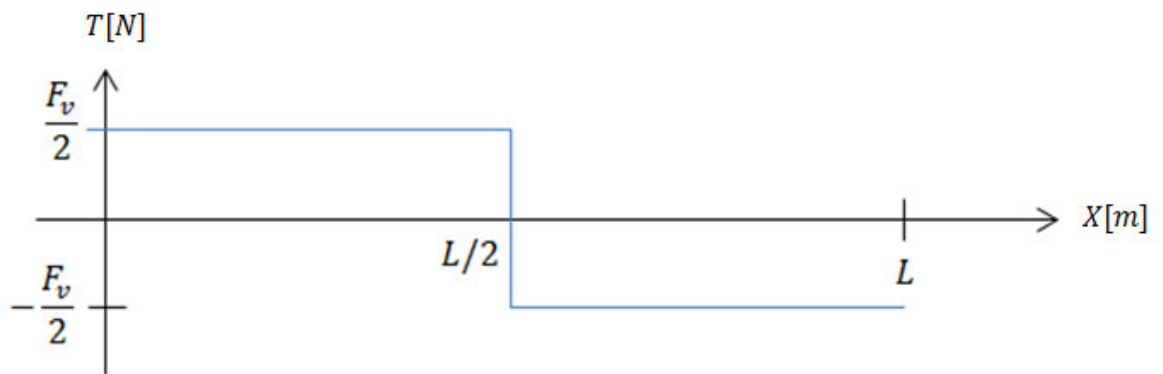


Figure II.9 : Diagramme des efforts tranchants

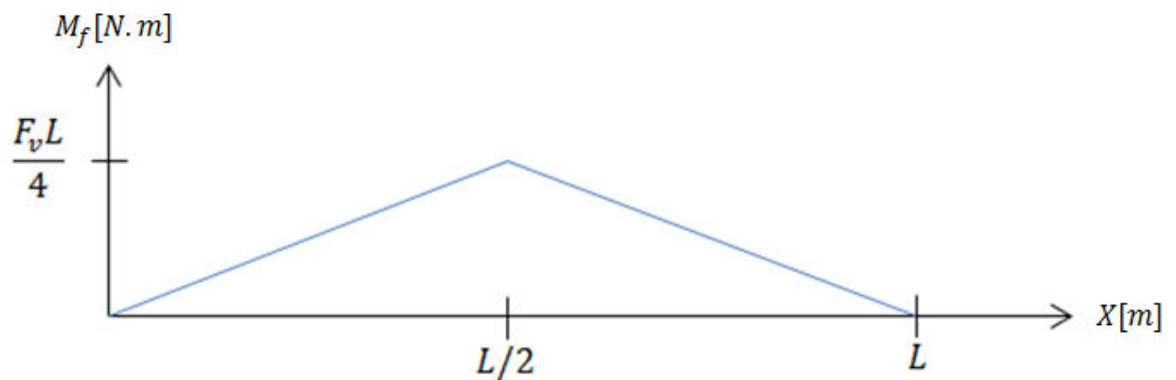


Figure II.10 : Diagramme des moments fléchissant

D'après le diagramme des moments fléchissant on relève le moment fléchissant maximum :

$$M_{fmax} = \frac{F_v \times L}{4} \quad (\text{II-23})$$

II.2.1.2 Etude en torsion

Nous avons vu précédemment qu'il y a un couple résistant créé par la poulie qui tend à tordre l'arbre. Pour dimensionner notre arbre il faut calculer le couple maximum créé par la poulie et pour ça nous allons prendre la puissance nominale de notre alternateur.

Pour calculer la puissance nominale de l'alternateur nous allons utiliser la loi suivante :

$$P = U \times I \quad (\text{II-24})$$

Avec :

P : Puissance nominale débitée par l'alternateur [W]

U : Tension nominale débitée par l'alternateur [V]

I : Courant nominal débité par l'alternateur [A]

La puissance dans la poulie de l'alternateur est la même que celle présente dans l'arbre, donc pour calculer le moment de torsion on utilise la loi suivante :

$$M_t = \frac{P}{\omega_a} \quad (\text{II-25})$$

Avec :

C_r : Couple résistant créé par la poulie [N.m]

ω_a : Vitesse de rotation de l'arbre [rad/s], on la détermine de la relation :

$$\omega_a = \frac{V_v}{R} \quad (\text{II-26})$$

V_v : Vitesse du vent [m/s], en supposant que les pertes sont négligeables.

R : Rayon du rotor de l'éolienne [m]

Application numérique

D'après l'équation II-23 on trouve le moment de flexion suivant :

$$M_{fmax} = \frac{F_v \times L}{4} = \frac{513 \times 1,72}{4} \Rightarrow M_{fmax} = 220,59 \text{ N.m}$$

D'après l'équation II-24, on calcule la puissance nominale de l'alternateur :

$$P = U \times I = 14 \times 80 \Rightarrow P = 1120 \text{ w}$$

On note que les valeurs de I et U sont obtenus de la plaque signalétique de l'alternateur.

On calcule la vitesse de rotation de l'arbre ω en utilisant l'équation II-26 :

$$\omega_a = \frac{V_v}{R} = \frac{30}{0.535} \Rightarrow \omega_a = 56,07 \text{ rad/s}$$

Pour calculer le moment de torsion on utilise la loi II-25 :

$$M_t = \frac{P}{\omega_a} = \frac{1120}{56,07} \Rightarrow M_t = 19,97 \text{ N.m}$$

D'après l'équation II-10, et en connaissant M_f , on calcule la valeur du Moment idéal de flexion :

$$M_i = \sqrt{M_f^2 + 0,75 \times M_t^2} = \sqrt{220,59^2 + 0,75 \times 19,97^2}$$

$$\Rightarrow M_i = 221,26 \text{ N.m} = 2,21 \cdot 10^5 \text{ N.mm}$$

La contrainte maximale que peut subir notre matériau (contrainte admissible par le matériau) est :

$$\sigma_{adm} = 355 \text{ N/mm}^2$$

Pour déterminer le diamètre de notre arbre, on utilise la loi II-13 :

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32}{\pi} \times \frac{M_i}{\sigma_{adm}}} \approx 2,17 \times \sqrt[3]{\frac{M_i}{\sigma_{adm}}}$$

On trouve : $d \geq 18,53 \text{ mm}$

Et on prend $d = 30 \text{ mm}$.

II.2.2 Dimensionnement du support

II.2.2.1 Barre horizontale

Lorsque le vent attaque les pales de l'éolienne, une force se crée dans la même direction du vent qui fait fléchir l'arbre, ce qui conduit à la flexion de la barre horizontale. Le point d'application de cette force se trouve au milieu de la barre.

Etude en flexion

On isole la barre horizontale et on représente les forces auxquelles elle est soumise dans la figure suivante :

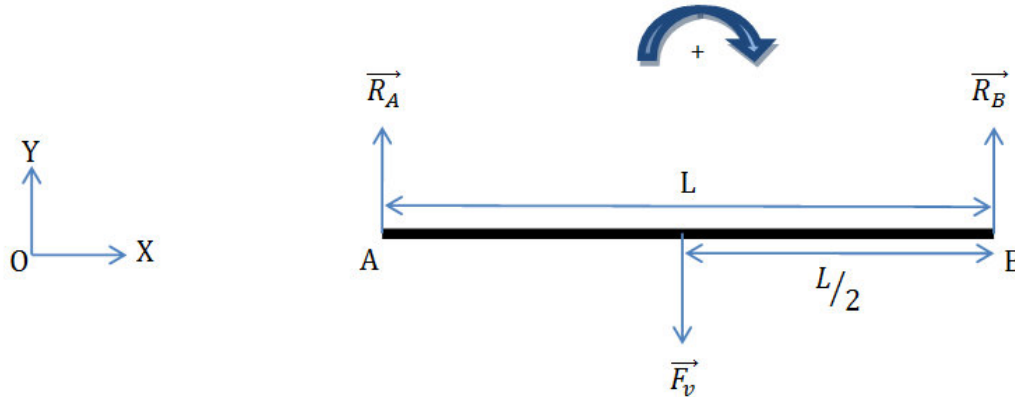


Figure II.11 : Isolation de la barre horizontale

Avec :

R_A et R_B , les réactions aux points A et B respectivement [N]

F_v : Force du vent [N]

L_h : Longueur de la barre [m]

En appliquant le principe fondamental de la statique sur la barre on trouve :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (\text{II-27})$$

$$\sum \vec{M} = \vec{0} \quad (\text{II-28})$$

$$(\text{II-27}) \Rightarrow \vec{R}_A + \vec{R}_B + \vec{F}_v = \vec{0}$$

En projetant les forces sur l'axe (OY) on aura :

$$R_A + R_B - F_v = 0 \quad (\text{II-29})$$

D'après l'équation (II-28) on aura :

$$F_v \times \frac{L_h}{2} - R_B \times L_h = 0$$

Ce qui donne :

$$R_B = \frac{F_v}{2} \quad (\text{II-30})$$

On remplace (II-30) dans (II-29) on trouve :

$$R_A = \frac{F_v}{2} \quad (\text{II-31})$$

Détermination des diagrammes des efforts tranchants T et des moments fléchissant M_f :

- Pour $0 \leq X < \frac{L_h}{2}$:

On isole la partition suivante et on représente les forces agissantes sur elle dans la figure qui suit :

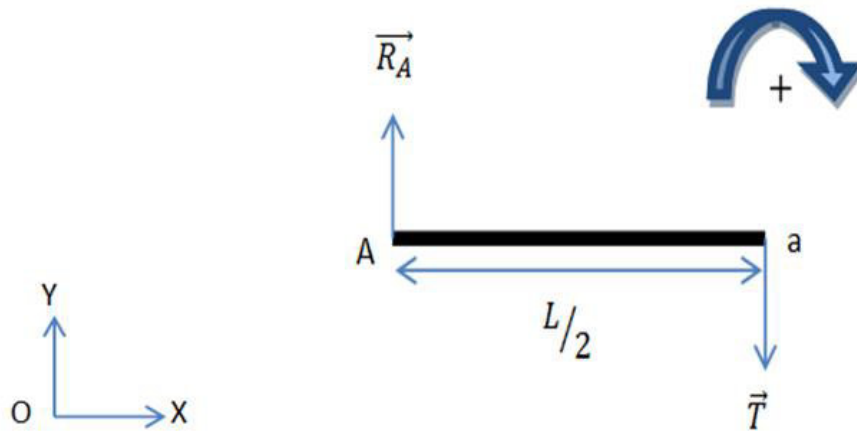


Figure II.12 : Isolation d'une partie de la barre horizontale

Avec :

\vec{T} : Effort tranchant [N]

En appliquant le principe fondamental de la statique sur la barre on trouve :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (\text{II-32})$$

$$\sum \vec{M} = \vec{0} \quad (\text{II-33})$$

$$(\text{II-32}) \Rightarrow \vec{R}_A + \vec{T} = \vec{0}$$

En projetant les forces sur l'axe (OY) on aura :

$$R_A - T = 0 \Rightarrow R_A = T \quad (\text{II-34})$$

En remplaçant (II-31) dans (II-34), on aura :

$$T = \frac{F_v}{2} \quad (II - 35)$$

D'après l'équation (II-33) on aura :

$$R_A \times X = M_f \quad (II-36)$$

- ❖ Pour $X = 0 \Rightarrow M_f = 0$
- ❖ Pour $X = \frac{L_h}{2} \Rightarrow M_f = \frac{R_A \times L_h}{2} = \frac{F_v \times L_h}{4}$
- Pour $\frac{L_h}{2} \leq X < L_h$:

On isole la partition suivante et on représente les forces agissantes sur elle dans la figure qui suit :

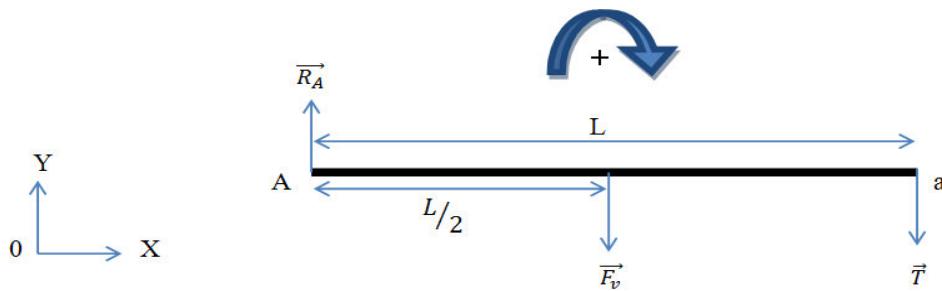


Figure II.13 : Isolation d'une partition de la barre horizontale

En appliquant le principe fondamental de la statique sur la barre on trouve :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (II-37)$$

$$\sum \vec{M} = \vec{0} \quad (II-38)$$

$$(II-37) \Rightarrow \vec{R}_A + \vec{F}_v + \vec{T} = \vec{0}$$

En projetant les forces sur l'axe (OY) on aura :

$$R_A - F_v - T = 0 \Rightarrow T = R_A - F_v \quad (II-39)$$

En remplaçant (II-31) dans (II-39), on aura :

$$T = -\frac{F_v}{2} \quad (II - 40)$$

D'après l'équation (II-38) on aura :

$$R_A \times X - F_v \left(X - \frac{L_h}{2} \right) = M_f \quad (\text{II-41})$$

❖ Pour : $X = \frac{L_h}{2} \Rightarrow M_f = \frac{F_v \times L_h}{4}$

❖ Pour : $X = L_h \Rightarrow M_f = 0$

D'après les valeurs de T trouvées, on aura le diagramme des efforts tranchants suivant :

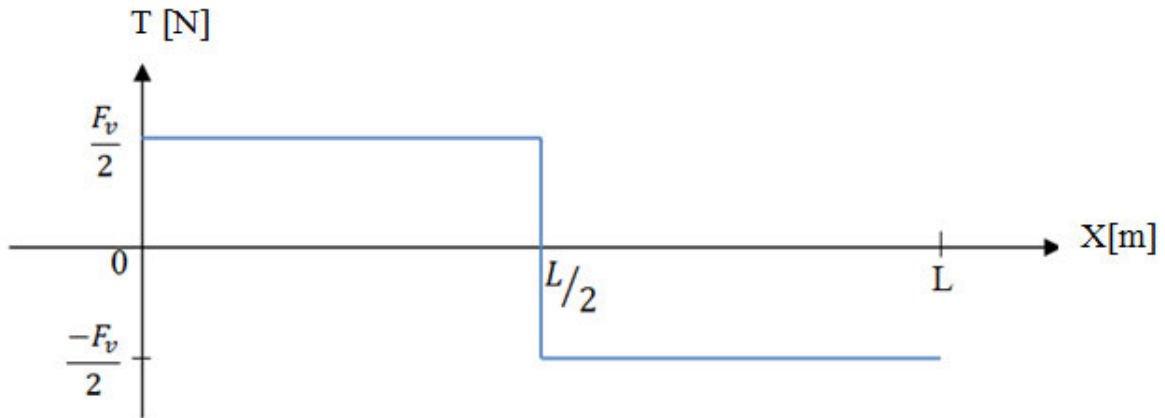


Figure II.14 : Diagramme des efforts tranchants

D'après les valeurs de M_f trouvées, on aura le diagramme des moments fléchissant suivant :

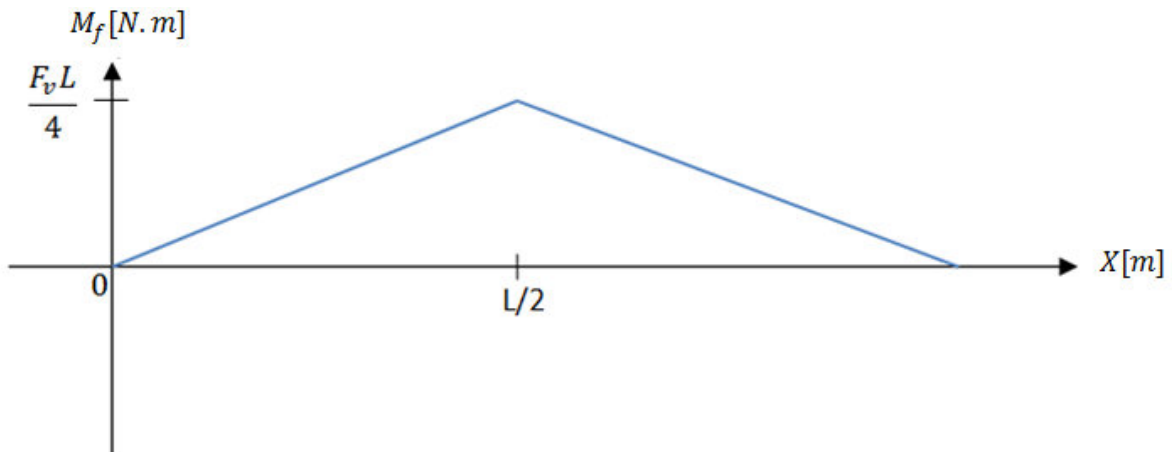


Figure II.15 : Diagramme des moments fléchissant

D'après le diagramme des moments fléchissant de la figure, on a le moment fléchissant

maximum :

$$M_{fmax} = \frac{F_v \times L_h}{4} \quad (\text{II-42})$$

Nous avons la relation :
$$\sigma_{max} = \frac{M_{fmax}}{I_{GZ}} \times \frac{H}{2} \quad (\text{II-43})$$

Avec :

σ_{max} : Contrainte maximale de flexion calculée [N/mm^2]

I_{GZ} : Moment quadratique [m^4]

H : Hauteur de la barre creuse [m]

La figure suivante représente une coupe de la barre creuse.

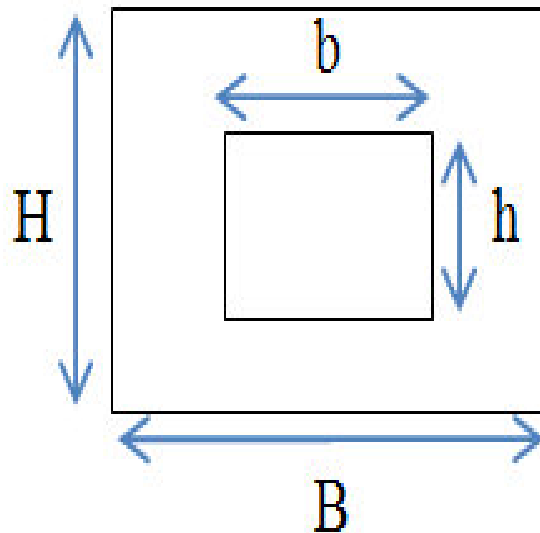


Figure II.16 : Coupe de la barre creuse

On a la loi du moment quadratique suivante :
$$I_{GZ} = \frac{B \times H^3}{12} - \frac{b \times h^3}{12} \quad (\text{II-44})$$

Application numérique

$$F_v = \frac{1}{2} \times Cr \times \rho \times V_v^2 \times S$$

Dans notre cas la force du vent est une force de trainée pure donc :

$$Cr = 1$$

Nous allons prendre une vitesse du vent de 30 m/s qui représente le début d'un ouragan.

La masse volumique de l'air est : $\rho = 1.2 \text{ Kg/m}^3$

Le vent s'applique initialement sur deux pales, donc on va prendre la surface

$$S = 2 \times 0.95 \times 0.5 \Rightarrow S = 0.95 \text{ m}^2$$

$$F_v = \frac{1}{2} \times 1 \times 1,2 \times 30^2 \times 0,95 \Rightarrow F_v = 513 \text{ N}$$

La longueur de la barre est : $L_h = 1.5 \text{ m}$

Donc :

$$M_{fmax} = \frac{513 \times 1,5}{4} \Rightarrow M_{fmax} = 192.375 \text{ N.m}$$

Nous avons :

$$B = 52 \text{ mm}, \quad H = 32 \text{ mm}, \quad b = 50 \text{ mm}, \quad h = 30 \text{ mm}$$

Donc :

$$I_{GZ} = \frac{52 \times 32^3}{12} - \frac{50 \times 30^3}{12} \Rightarrow I_{GZ} = 29494.667 \text{ mm}^4$$

Donc :

$$\sigma_{max} = \frac{192,375 \times 1000}{29494,667} \times \frac{32}{2} \Rightarrow \sigma_{max} = 104,357 \text{ N/mm}^2$$

La contrainte maximale que peut subir notre matériau (contrainte admissible par le matériau) est :

$$\sigma_{adm} = 355 \text{ N/mm}^2$$

Maintenant on doit vérifier que la contrainte maximale de flexion calculée est inférieure à la contrainte maximale que peut subir notre matériau (contrainte admissible par le matériau).

Nous avons :

$$\sigma_{adm} > \sigma_{max}$$

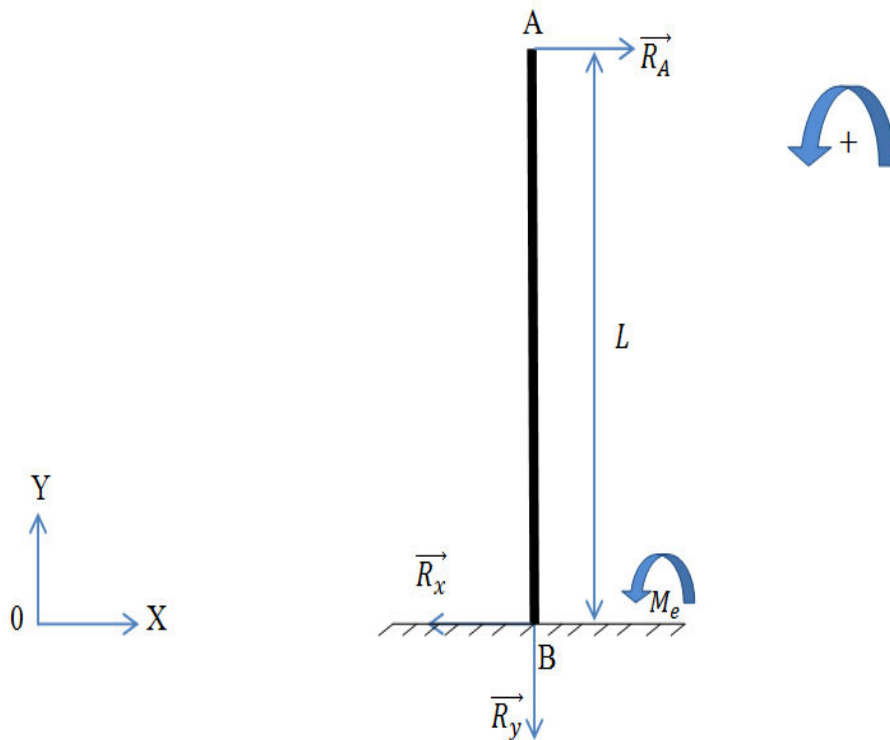
Donc la condition de résistivité est vérifiée.

II.2.2.2 Barre verticale

La barre verticale est soumise à la réaction \vec{R}_A due à la barre horizontale et aux réactions d'encastrement \vec{R}_x et \vec{R}_y et au moment d'encastrement \vec{M}_e , le support sur lequel repose tous l'ensemble est assez renforcé de tel sorte qu'il est assimilé à un encastrement.

Etude en flexion

L'isolation de la barre verticale et la représentation des forces agissant sur elle sont représenté à la figure suivante :



FigureII.17 : Isolation de la barre verticale

Avec :

\vec{R}_A : Réaction au point A [N]

\vec{R}_x et \vec{R}_y : Réactions d'encastrement selon l'axe (OX) et (OY) respectivement [N]

\vec{M}_e : Moment d'encastrement [N.m]

L_v : Longueur de la barre [m]

En appliquant le principe fondamental de la statique sur la barre on trouve :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (II-45)$$

$$\sum \vec{M} = \vec{0} \quad (II-46)$$

$$(II-45) \Rightarrow \vec{R}_A + \vec{R}_x + \vec{R}_y = \vec{0}$$

En projetant les forces sur l'axe (OX) on aura :

$$R_A - R_x = 0 \Rightarrow R_x = R_A \Rightarrow R_x = \frac{F_v}{2} \quad (II-47)$$

D'après l'équation (II.46) on aura :

$$M_e - R_A \times L_v = 0 \Rightarrow M_e = R_A \times L_v \quad (II-48)$$

Détermination des diagrammes des efforts tranchants T et des moments fléchissant M_f :

- Pour $0 \leq X < L_v$:

On isole la partition suivante et on représente les forces agissantes sur elle dans la figure qui suit :

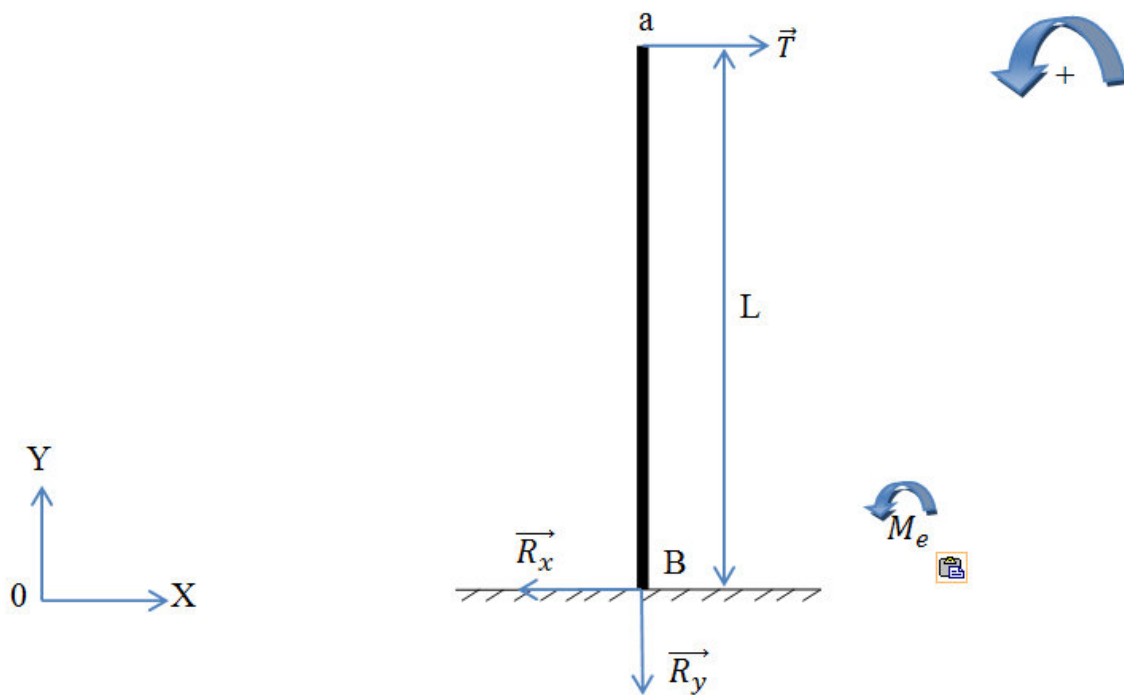


Figure II.18 : Isolation d'une partition de la barre horizontale

En appliquant le principe fondamental de la statique sur la barre on trouve :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0} \quad (\text{II-49})$$

$$\sum \vec{M} = \vec{0} \quad (\text{II-50})$$

$$(\text{II-49}) \Rightarrow \vec{T} + \vec{R}_x + \vec{R}_y = \vec{0}$$

En projetant les forces sur l'axe (OX) on aura :

$$T - R_x = 0 \Rightarrow T = R_x = \frac{F_v}{2} \quad (\text{II-51})$$

D'après l'équation (II-50) on aura :

$$M_e + M_f - R_A \times X = 0 \Rightarrow M_f = R_A \times X - M_e \quad (\text{II-52})$$

❖ Pour : $X = 0$:

$$M_f = -M_e = -\frac{F_v}{2} \times L_v$$

❖ Pour : $X = L$:

$$M_f = -M_e + R_A \times L_v \Rightarrow M_f = -M_e + \frac{F_v}{2} \times L_v = -\frac{F_v}{2} \times L_v + \frac{F_v}{2} \times L_v \Rightarrow M_f = 0$$

D'après les valeurs de T trouvées, on aura le diagramme des efforts tranchants suivant :

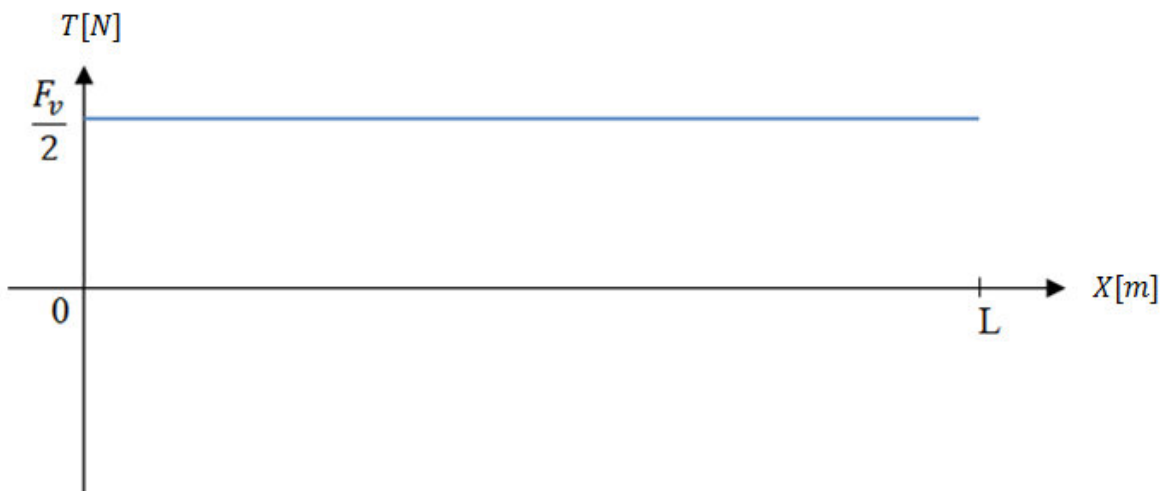


Figure II.19 : Diagramme des efforts tranchants

D'après les valeurs de M_f trouvées, on aura le diagramme des moments fléchissant suivant :

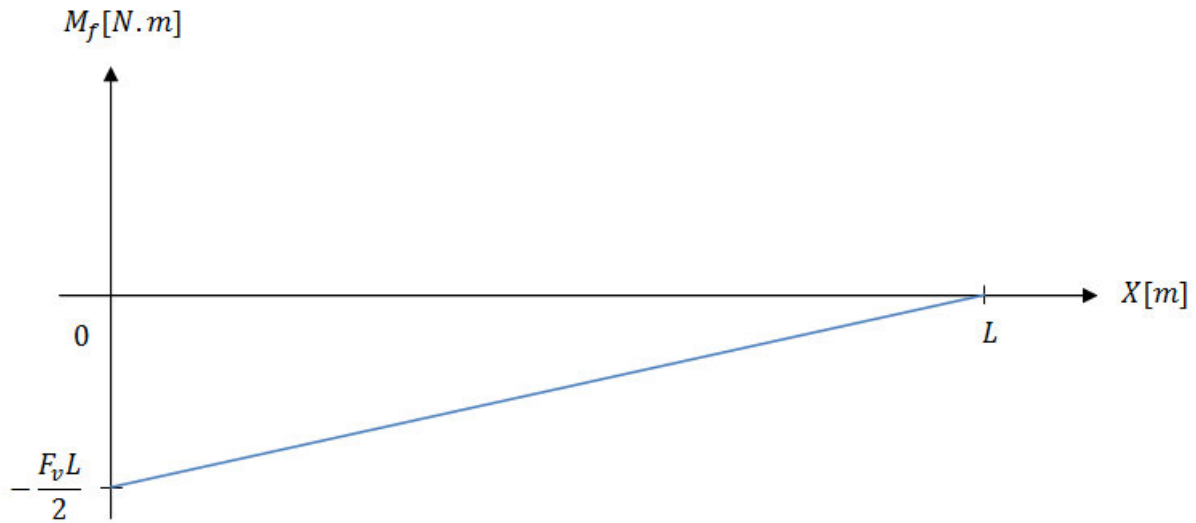


Figure II.20 : Diagramme des moments fléchissant

D'après le diagramme des moments fléchissant de la figure, on a le moment fléchissant maximum :

$$M_{fmax} = \frac{F_v \times L_v}{2} \quad (\text{II-53})$$

Application numérique

$$M_{fmax} = \frac{513 \times 1.7}{2} \Rightarrow M_{fmax} = 436,05 \text{ N.m}$$

Donc :

$$\sigma_{max} = 266,112 \text{ N/mm}^2$$

Nous avons :

$$\sigma_{adm} > \sigma_{max}$$

Donc la condition de résistivité est vérifiée.

Remarque

La barre verticale a le même Moment quadratique I_{GZ} que la barre horizontale car les dimensions B, b, H et h de la vue en coupe sont les mêmes.

II.3 Alternateur à griffes

Dans notre travail, on veut produire de l'électricité en transformant l'énergie mécanique récoltée sur l'arbre de l'éolienne en énergie électrique, et pour cela on va utiliser un alternateur à griffes. Ce dernier est utilisé pour produire de l'électricité dans une voiture. Nous allons donc l'insérer directement dans notre système éolien.

II.3.1 Electricité dans l'automobile

L'électricité dans l'automobile d'aujourd'hui a pris beaucoup d'importance. En effet, l'électricité et l'électronique offrent la possibilité de rajouter des dispositifs permettant d'améliorer certaines caractéristiques des automobiles comme le confort (électrification des vitres et des sièges, chauffage), la sécurité active (système antiblocage des roues ABS, contrôle de stabilité ESP), la sécurité passive (airbags, prétensionneurs de ceintures de sécurité) et enfin la consommation d'essence et la pollution (gestion électronique du moteur, soupapes électromagnétiques, catalyseur). Pour des raisons de poids, de coût et de contrôle optimal, certains organes hydrauliques et mécaniques sont progressivement remplacés par des dispositifs électrotechniques. C'est le cas de la direction assistée, des freins, des suspensions actives, de la climatisation...ect. Cette électricité consommée est produite par un générateur qui est actuellement un alternateur à griffes. Ces alternateurs sont très compétitifs d'un point de vue économique et présentent une bonne puissance massique. En contrepartie, ils ont un rendement médiocre, de l'ordre de 50 % [14].

II.3.2 Différents organes de l'alternateur à griffes

Les alternateurs à griffes (figure II.21) sont classés dans la famille des alternateurs synchrones triphasés. La spécificité de ces alternateurs provient de la construction atypique du rotor en forme de griffes [14].

En général, les alternateurs à pôles en forme de griffes ont un diamètre plus grand et une longueur plus faible que les machines synchrones classiques. La particularité technologique utilisée dans les alternateurs à griffes (un seul enroulement d'excitation) permet de diminuer les coûts de fabrication et d'avoir une machine robuste par rapport aux forces centrifuges qui s'exercent dans le rotor [14].

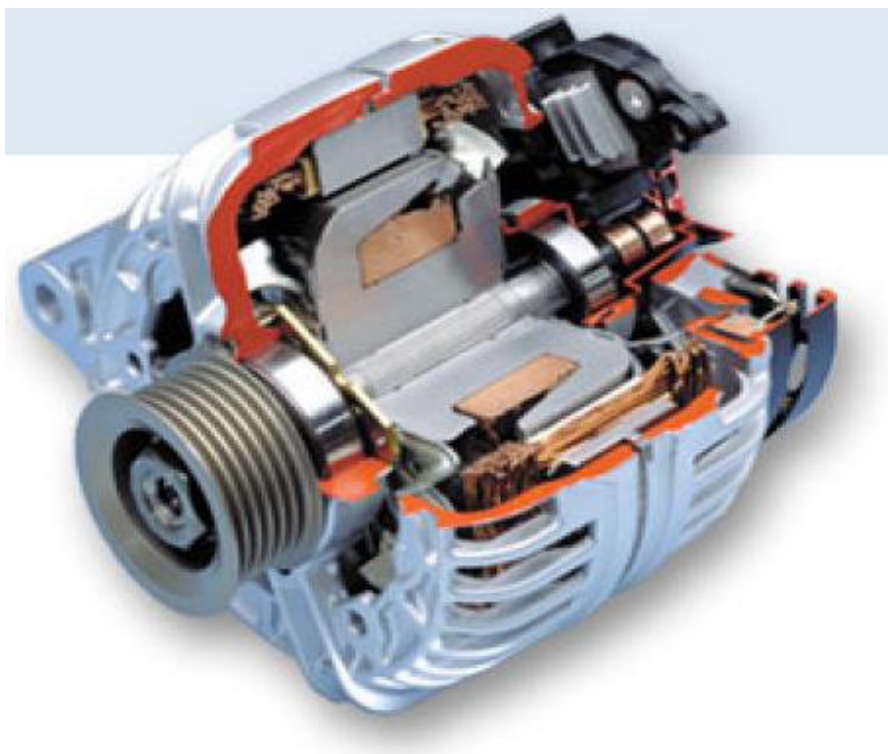


Figure II.21 : Vue en coupe d'un alternateur à griffes

L'alternateur à griffes est principalement constitué de deux armatures: Le stator et le rotor séparés par un entrefer, d'un redresseur, d'une paire de paliers et d'un régulateur. La figure II.22 montre une vue éclatée de cet alternateur :

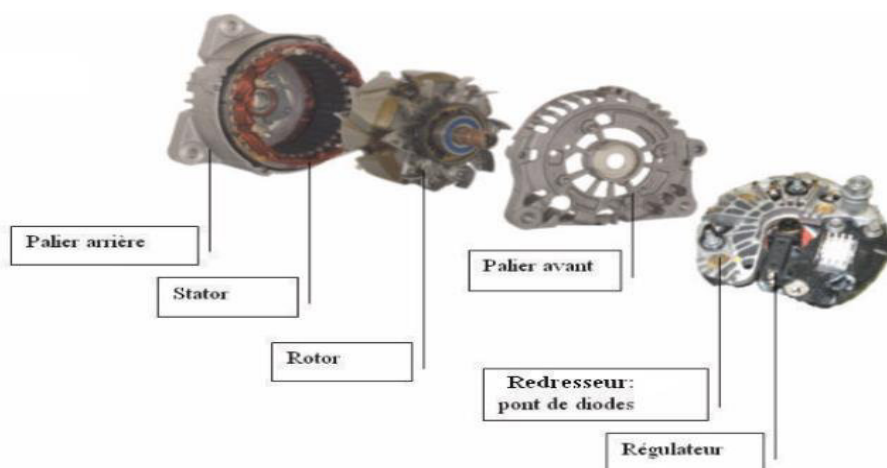


Figure II.22 : Vue éclatée d'un alternateur à griffes [15]

Tandis que la figure II.23 représente son circuit électrique :

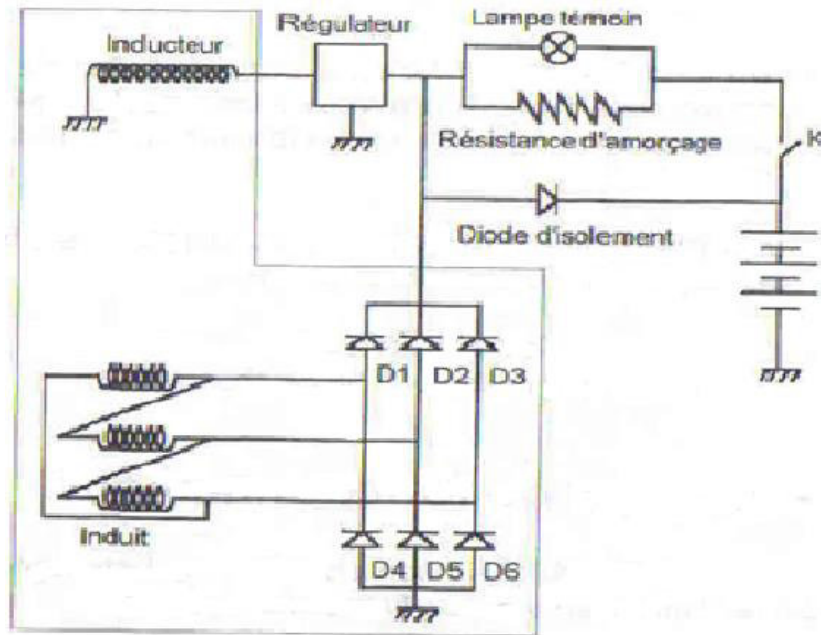


Figure II.23 : Circuit électrique d'un alternateur auto

a. Moteur à l'arrêt

La diode d'isolement et l'interrupteur K, déconnectent l'alternateur de la batterie.

b. Moteur en marche

L'interrupteur K se ferme (contact) et la batterie alimente le circuit inducteur via la résistance d'amorçage, la lampe témoin s'allume, le circuit induit délivre alors une tension sinusoïdale dont le module est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Cette tension redressée par le pont de diode PD3 va polariser en direct la diode d'isolement, cette dernière rentre en conduction et ceci aura pour conséquences :

- La résistance d'amorçage est court-circuitée.
- La lampe témoin s'éteint.
- Le circuit inducteur n'est plus alimenté par la batterie mais par le circuit induit lui-même.
- La tension redressée étant supérieure à celle de la batterie, cette dernière se met en charge.

II.3.2.1 Stator des alternateurs à griffes

Le stator est constitué de tôles isolées pourvues d'encoches pour le bobinage. L'épaisseur des tôles est généralement de 0,5 mm et parfois de 0,35 mm. Les enroulements sont triphasés et le couplage est souvent en triangle. La plupart des alternateurs ont une encoche par pôle et par phase, cependant certains en présentent deux. En général, ces alternateurs sont bobinés avec deux fils en main [14].

Dans le cas des alternateurs à une encoche par pôle et par phase, le nombre de dents statoriques est de 36, 42 ou 48 pour 6, 7 et 8 paires de pôles. Pour les alternateurs à deux encoches par pôle et par phase, nous retrouvons respectivement 72, 84 et 96 dents statoriques. Le nombre de spires statoriques est de l'ordre d'une cinquantaine de spires par phase, et la résistance aux bornes de deux enroulements ne dépasse pas les quelques centaines de milli-ohms [16].

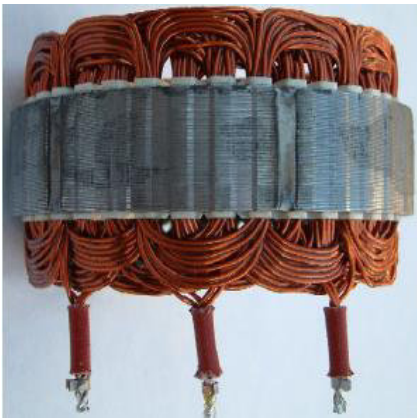


Figure II.24 : Stator de l'alternateur à griffes



Figure II.25 : Coupe du stator

Certains stators d'alternateurs à griffes sont fabriqués avec un processus un peu spécial. En effet, le process slinky permet de réduire les chutes de matière première. Au lieu de découper les tôles du stator une par une, on découpe un ruban qui sera ensuite enroulé en hélice pour former le circuit magnétique du stator (figure II.26). Cette technologie permet de réduire les chutes de matière première car on peut découper deux stators avec le même ruban en utilisant les espaces des encoches de l'un comme dents de l'autre. Ensuite le bobinage, ondulé, est mis en forme (figure II.27) avant d'être inséré dans le paquet de tôle en une fois ou en plusieurs fois (figure II.28 et figure II.29) [14].



Figure II.26 : Processus slinky, construction du stator en hélice

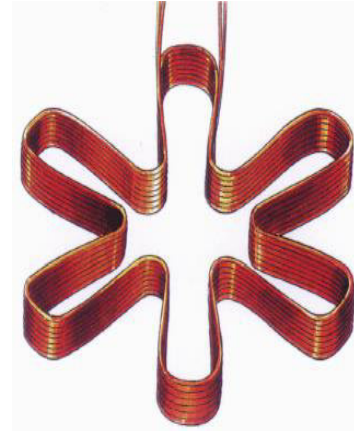


Figure II.27 : Marguerite, mise en forme du bobinage ondulé d'une phase

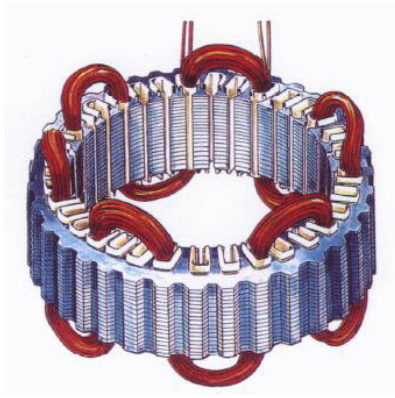


Figure II.28 : Insertion du bobinage d'une phase dans le paquet de tôles

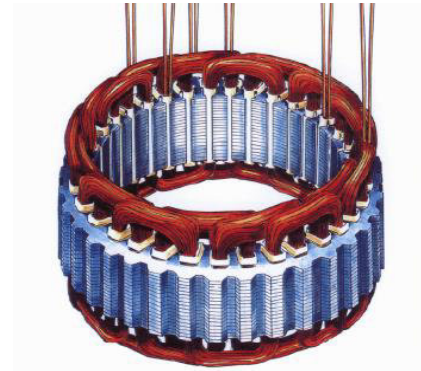


Figure II.29 : Insertion des bobinages des autres phases

II.3.2.2 Rotor des alternateurs à griffes

Le rotor constitue l'inducteur de la machine. Il comporte un noyau cylindrique axial muni d'une bobine excitatrice alimentée par l'intermédiaire de deux bagues, et deux roues polaires en forme de griffes, portant chacune des pôles qui s'intercalent les uns dans les autres de façon à constituer alternativement une succession de pôles Nord et Sud. Ces plateaux à griffes sont réalisés avec un matériau ferromagnétique massif (il n'y a pas de feuilletage, donc les pertes fer seront importantes, notamment à cause des courants de Foucault). Le matériau utilisé est l'acier dont l'aimantation à saturation varie entre 2 et 2.2 Tesla. La caractéristique magnétique de l'acier utilisé est donnée à la figure II.30 [16].

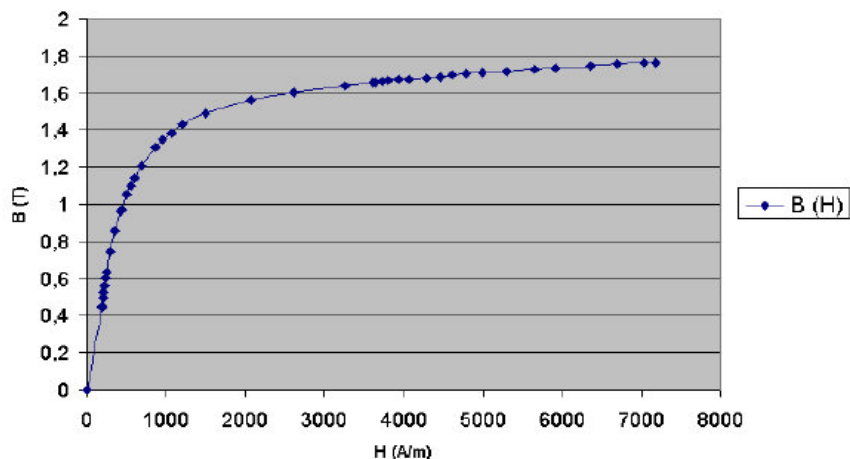


Figure II.30 : Caractéristique magnétique mesurée de l'acier rotor

Généralement le nombre de pôles est de 12, voire de 16 pour certains modèles de puissances importantes. Le nombre de spires de l'enroulement rotorique et sa résistance sont respectivement de l'ordre de 400 spires et 2 Ohms [16].



Figure II.31 : Rotor de l'alternateur à griffes

Figure II.32 : Vue d'une griffe de l'alternateur



Figure II.33 : Vue de la bobine d'excitation et du noyau de l'alternateur

II.3.2.3 Redresseur

La tension fournie par les enroulements statoriques est sinusoïdale, elle doit donc être redressée pour charger la batterie et alimenter le réseau de bord du véhicule. Pour cela on utilise un redresseur PD3 non commandé. La figure II.34 représente le redresseur, tandis que la figure II-35 représente le schéma électrique du redressement réalisé par le logiciel de simulation PSIM.

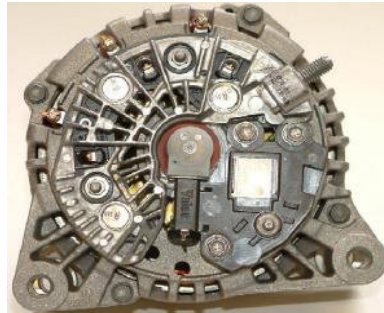


Figure II.34 : Redresseur de l'alternateur à griffes

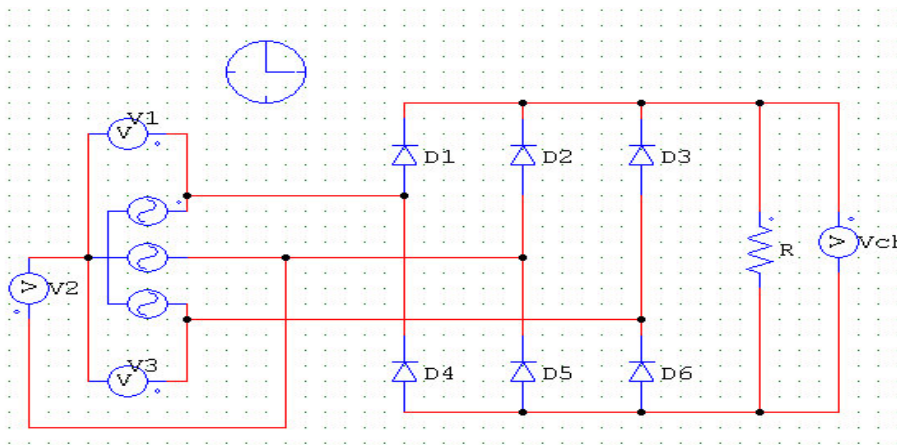


Figure II.35 : Redressement de la tension fournie par l'alternateur

$$v1 = v \times \sqrt{2} \times \sin(\omega \times t)$$

$$v2 = v \times \sqrt{2} \times \sin(\omega \times t - \frac{2 \times \pi}{3})$$

$$v3 = v \times \sqrt{2} \times \sin(\omega \times t + \frac{2 \times \pi}{3})$$

$$\theta = \omega \times t$$

Avec :

v : Valeur efficace d'une tension simple du réseau alimentant le redresseur [v]

ω : Pulsation des courants statorique [rad/s]

t : Temps [s]

θ : Déphasage [rad]

v_1, v_2 et v_3 représente un système équilibré de tensions sinusoïdales alimentant le redresseur, elles sont déphasées de 120° les unes par rapport aux autres, de fréquence 50HZ et sont représentées sur la figure II.36.

La tension redressée (tension de charge) V_{ch} possède une période de $\pi/3$. On va donc trouver la valeur moyenne de V_{ch} .

$$V_{chmoy} = \frac{1}{T} \times \int_0^T V_{ch}(t) \times dt$$

On fait un changement de variables :

$$V_{chmoy} = \frac{3}{\pi} \times \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_{ch}(\theta) \times d\theta \Rightarrow V_{chmoy} = \frac{3}{\pi} \times \int_{\pi/6}^{\pi/2} (v_1(\theta) - v_2(\theta)) \times d\theta$$

Nous obtenons finalement :

$$V_{chmoy} = \frac{3 \times \sqrt{6}}{\pi} \times v \quad (\text{II-54})$$

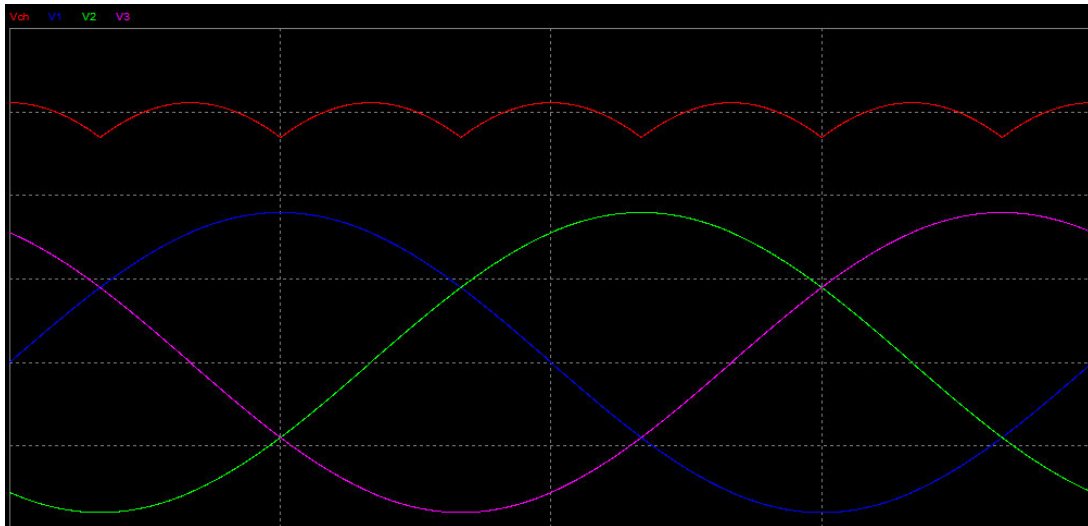


Figure II.36 : Courbe de v_1, v_2, v_3 et V_{ch} en fonction du temps

II.3.2.4 Régulateur

Le régulateur électronique permet de réguler la tension du réseau de bord en fonction de la charge de la batterie. Cet organe contrôle donc, à la manière d'un hacheur série, le courant

d'excitation de l'alternateur afin que le débit de l'alternateur, quelle que soit sa vitesse de rotation, s'adapte à la charge de la batterie. En général, le régulateur est couplé avec les balais de l'excitation.



Figure II.37 : Régulateur de l'alternateur à griffes

En effet, en agissant sur le courant d'excitation donc sur l'induction magnétique (B), le régulateur réduit ce courant si la vitesse de rotation (la fréquence (f) des courants induits au stator) a une valeur trop importante, l'augmente si celle-ci est trop petite, donc il fait en sorte que la f.e.m. induite (e) reste constante malgré la variation de (f). Ceci est défini par la formule de Boucherot :

$$E = 4.44 \times B \times n \times f \times S_{cr} \quad (\text{II-55})$$

Où :

E : F.é.m. induite [V]

B : Induction magnétique [T]

n : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

f : Fréquence du courant statorique [Hz]

S_{cr} : Section du circuit magnétique [Cm^2]

En effet, Il existe deux types de régulateurs pour alternateurs d'automobiles : [17]

- Les régulateurs électromagnétiques.
- Les régulateurs électroniques.

A. Régulateur électromagnétique

Aussi dit régulateur à palette vibrante, son principe de fonctionnement est le suivant :

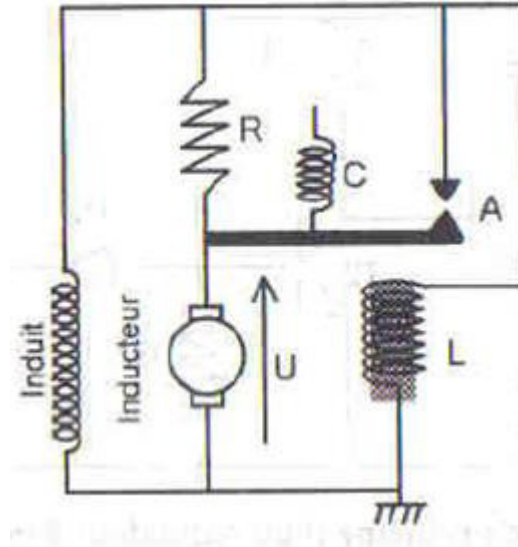


Figure II.38 : Schéma du principe d'un régulateur électromagnétique

Au repos, le circuit inducteur est alimenté sous la tension de débit de l'induit. Le ressort C ferme la palette sur le contact A.

Lorsque la vitesse augmente, la tension induite U augmente elle aussi jusqu'à atteindre un seuil qui permet à la bobine L de vaincre la force exercée par le ressort sur la palette. Le contact en A s'ouvre et la résistance R entre dans le circuit inducteur, réduisant ainsi l'intensité du courant y circulant et par conséquent, la tension de débit de l'induit diminue.

B. Régulateur électronique

Il existe une multitude de montages pour la régulation électronique de la tension de débit des alternateurs. Nous représentons dans la figure ci-dessous le schéma de principe de ces régulateurs.

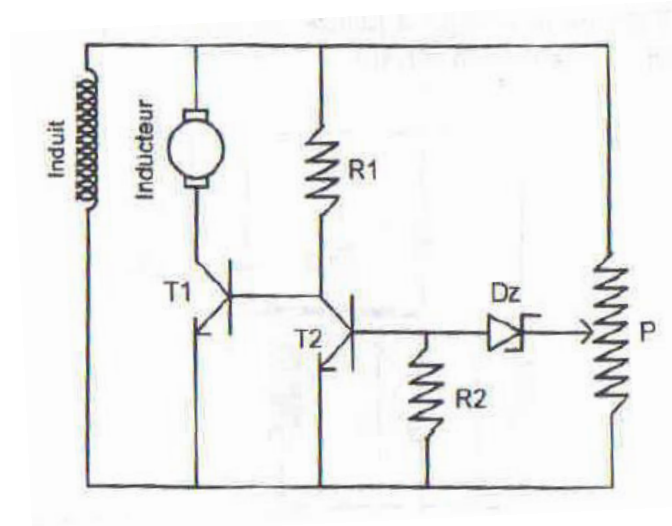


Figure II.39 : Schéma du principe du régulateur électronique

L'élément de base de ce montage est la diode Zener Dz. Tant que sa tension de claquage n'est pas atteinte, le transistor T2 reste bloqué. Le transistor T1, dont la base est reliée à la tension induite par la résistance R1, permet à l'alternateur de charger la batterie.

Dès que la tension de débit devient trop forte, Dz conduit. Le transistor T2, devenu passant, réduit le courant de base de T1, ce qui entraîne une chute de la tension induite.

II.3.2.5 Paliers

Nous désignons par paliers, les flasques et les paliers proprement dit munis de roulements à billes. Ils comportent des ouvertures entre lesquelles il y a des ailettes optimisées pour améliorer le refroidissement de la machine. Les paliers supportent l'arbre qui assure la liaison de l'alternateur avec le moteur thermique, ils sont représentés à la figure II.40 [16].



II.40.a: Palier avant



II.40.b: Palier arrière

Figure II.40 : Paliers avant et arrière de l'alternateur à griffes

II.3.3 Principe de fonctionnement

La première difficulté lorsque l'on cherche à comprendre le fonctionnement d'un alternateur à griffes est de bien savoir le parcours du flux inducteur. Le trajet de ce flux est décrit sur la figure II.41 [14].

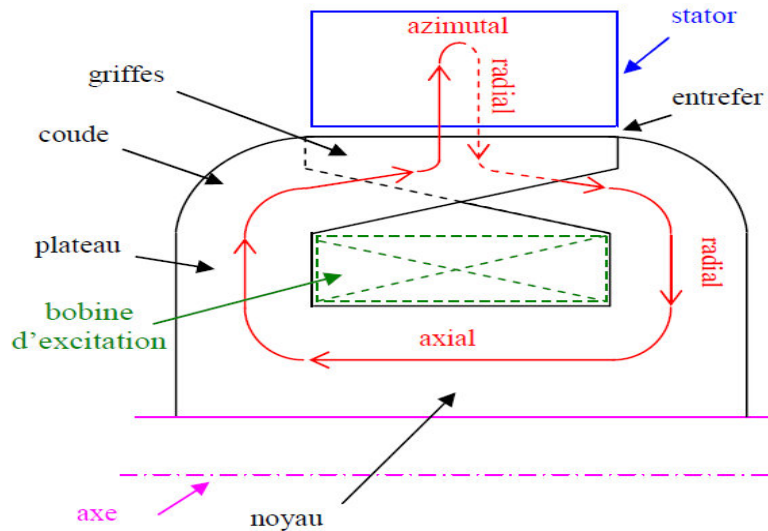


Figure II.41: Ligne moyenne du flux inducteur sur un pas polaire

La bobine d'excitation crée un champ axial dans le noyau, et il apparaît donc aux extrémités du noyau (qui sont les plateaux à griffes) une polarisation magnétique « nord » et une polarisation magnétique « sud ». Les plateaux à griffes sont réalisés de façon à ce que lorsqu'on assemble le rotor, les griffes viennent s'intercaler les unes entre les autres. On obtient donc finalement au niveau de l'entrefer, une succession de pôles nord et sud. L'alternateur à griffes est donc une machine synchrone hétéropolaire à p paires de pôles et à pôles saillants [14].

Sur la figure II.42, on comprend aisément le trajet du flux inducteur : il traverse axialement le noyau, devient radial dans le plateau et est axial et radial dans la griffe. Après, il traverse l'entrefer, passe dans la denture statorique (tout cela dans une direction radiale) et passe dans la culasse où le champ a une direction azimuthale (dans le sens du feuilletage). Il faut remarquer que le flux qui sort d'une griffe se sépare en deux pour rentrer dans les deux griffes adjacentes, et ça, après le passage dans le stator (figure II.43) [14].

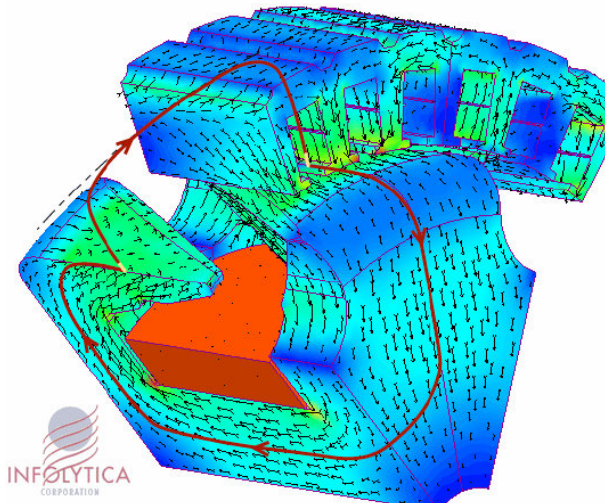


Figure II.42 : Trajets des flux magnétiques dans un alternateur à griffes

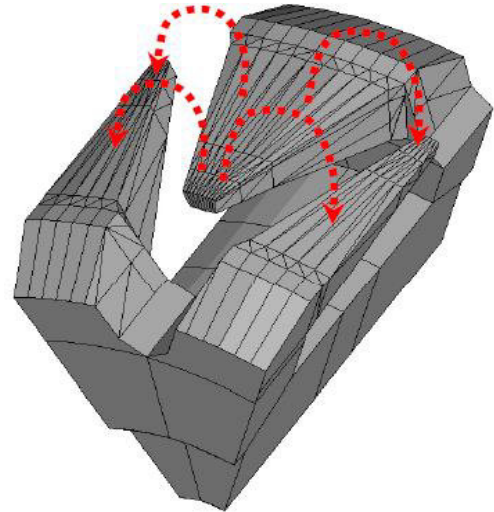


Figure II.43: Coupe du rotor

L'entraînement mécanique du rotor induit un champ tournant au stator qui va créer aux bornes de chaque enroulement du stator, une force électromotrice proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor et au flux embrassé par chaque spire. Un système de tensions triphasées est alors généré aux bornes de l'induit car le bobinage du stator est un bobinage triphasé ondulé à pas diamétral.

La forte excitation magnétique du rotor combinée avec la spécificité de la géométrie implique des fuites magnétiques importantes, surtout entre griffes. Ces fuites prennent de l'importance lorsque le matériau magnétique est saturé. Pour mieux exploiter l'excitation magnétique de l'inducteur, certains alternateurs sont munis d'aimants permanents entre griffes (figure II.44 et II.45) qui permettent de polariser magnétiquement le rotor en inverse. Ainsi, la saturation magnétique est diminuée dans le rotor, ce qui permet d'obtenir plus de flux utile [14].



Figure II.44 : Rotor munis d'aimants permanents entre griffes

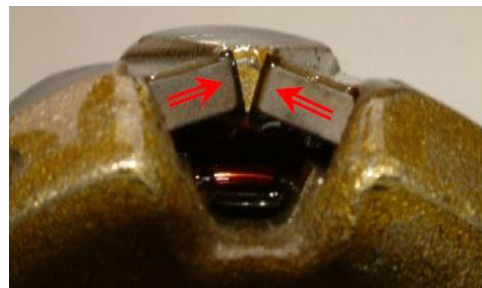


Figure II.45 : Vue du bout d'une griffe

II.3.4 Bilan de puissance

Le faible niveau du rendement de l'alternateur à griffes nécessite une bonne évaluation des différentes pertes qui apparaissent dans la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le bilan énergétique est donné à la figure II.46 [16].

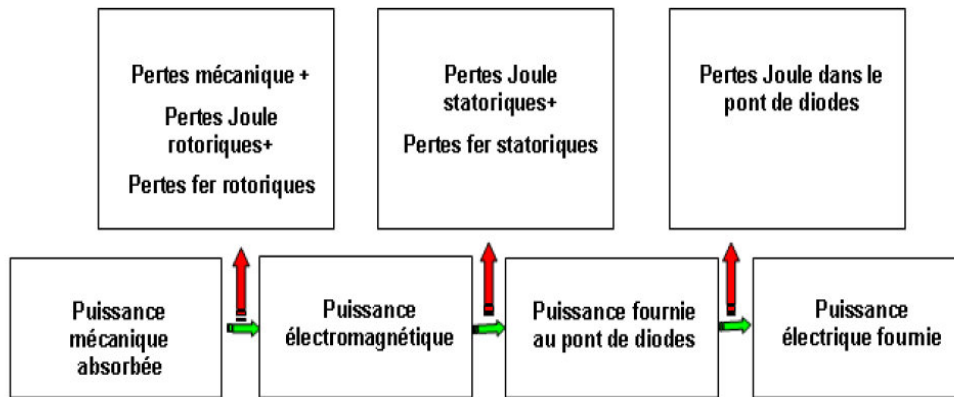


Figure II.46 : Bilan énergétique de l'alternateur à griffes

Nous pouvons classer les pertes en 3 catégories distinctes :

- Pertes mécaniques.
- Pertes par effet Joule.
- Pertes fer dans les parties magnétiques.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons fait l'étude théorique nécessaire de la partie mécanique et la présentation de l'alternateur à griffes, pour passer au dimensionnement et à la réalisation de notre éolienne.

Chapitre III
Réalisation et
dessin des organes

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les composants qui ont servi à réaliser notre projet, vérifier leurs résistivités et présenter les étapes de réalisations de notre éolienne, ainsi que les dessins en coupe réalisés par le logiciel AUTOCAD.

III.1 Matériel utilisé

- Deux barres rectangulaires creuses en acier de 2mm d'épaisseur de dimensions ($52mm \times 32mm$) et de longueurs suivantes : (1.8m, 1.5m, 1.2m, 0.6m)
- Quatre tôles d'acier inoxydable de 0.6mm d'épaisseur et de dimension ($0.95m \times 0.50m$)
- Deux arbres pleins en acier A60 de 30mm de diamètre et de longueurs 1.7m et 0.5m
- Huit tiges de fer plat de 3mm d'épaisseur et de dimension ($2cm \times 95cm$)
- Huit tiges de fer plat de 5mm d'épaisseur et de dimension ($2cm \times 60cm$)
- Trois roulements à billes et un roulement à rouleaux coniques
- Un arbre en acier A40 de 70 mm de diamètre et 200 mm de longueur
- Un alternateur d'automobile
- Deux courroies
- Des rivets

III.2 Réalisation

III.2.1 support

A l'aide d'une scie électrique, nous avons coupé les barres rectangulaires creuses de dimensions citées précédemment, et nous les avons soudé de telle manière à avoir la structure représentée dans la figure suivante:



Figure III.1 : Support de l'éolienne

III.2.2 Pales

Pour une meilleur performance de l'éolienne, nous avons laissé un espace de $e = 10\text{ cm}$ entre deux pales.

Pour adopter la forme suivante :

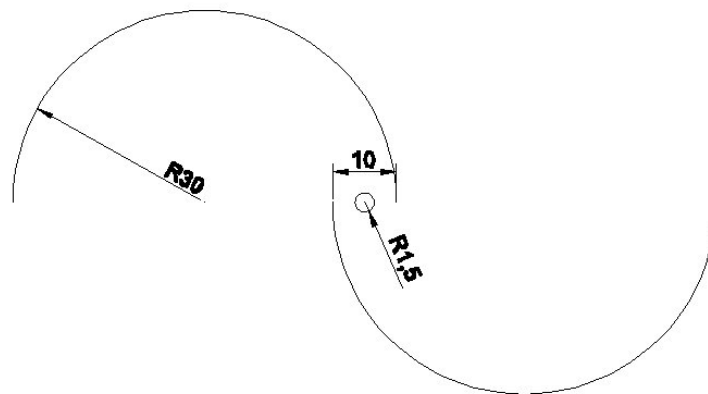


Figure III.2 : Forme des pales

Nous avons pris huit tiges de fer plat de 3mm d'épaisseur et de dimension ($2\text{cm} \times 95\text{cm}$), et à l'aide d'une cintreuse nous les avons courbé de telle manière à former des demi cercles après ça on les a troués avec une perceuse comme le montre la figure suivante :



Figure III.3 : Fer plat en forme de demi-cercle

Ensuite, en utilisant une cisaille, nous avons coupé quatre tôles d'acier inoxydable de 0.6mm d'épaisseur et de dimension ($0.95m \times 0.50m$) et on les a troué également.

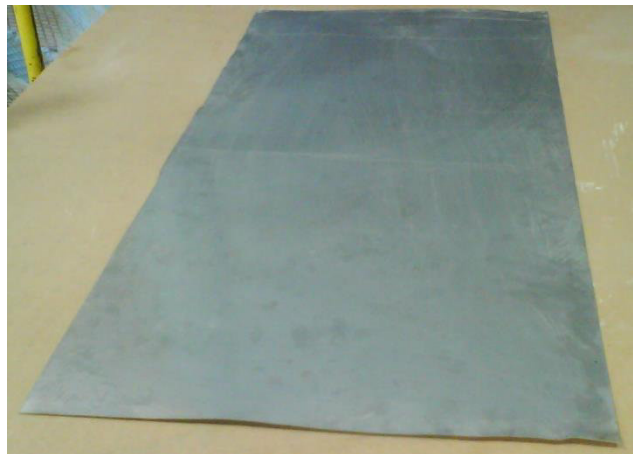


Figure III.4 : Tôle en acier inoxydable

Enfin, au moyen de rivets nous avons fixé deux tiges sur chaque tôle pour qu'elles prennent la forme de demi-cercle.



Figure III.5 : Pale

III.2.3 Arbre

A l'aide d'une scie électrique, nous avons coupé un arbre plein de longueur $L = 1,72\text{ m}$ et de diamètre $d = 30\text{ mm}$, ensuite on a charioté 10 cm d'une extrémité de cet arbre pour avoir un diamètre de 25 mm dans le but d'insérer une poulie récupérée d'une machine à laver dont le diamètre de l'alésage est de 25 mm .

En utilisant une plieuse on a plié des tiges de fer plat de 5mm d'épaisseur et de dimension ($2\text{ cm} \times 60\text{ cm}$) qui vont servir comme support pour les pales.



Figure III.6 : Support pour pales.

Après sa, nous les avons soudées à l'arbre.

III.2.4 Multiplicateur de vitesse

Nous voulons multiplier la vitesse de tel sorte que quand la vitesse du vent est égale a 5m/s l'alternateur tourne à une vitesse de 1500 tr/min, pour cela nous devons calculer la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne en appliquant la relation suivante :

$$V_v = \omega \times R_r \Rightarrow \omega = \frac{V_v}{R_r} \Rightarrow \omega = \frac{5}{0.55} = 9.09 \text{ rd/s}$$

Nous aurons la vitesse en tr/min :

$$N_r = \frac{9.09 \times 60}{2 \times \pi} = 86.81 \text{ tr/min}$$

Donc notre rapport de multiplication sera :

$$r = \frac{N_a}{N_r} = \frac{1500}{86.81} = 17.27$$

Le diamètre de la poulie de notre alternateur est égal à 2.5 cm

Si nous utilisons un rapport de multiplication direct, nous obtenons un diamètre de la poulie de l'axe de 43.175 cm ce qui n'est pas disponible, c'est pour cela qu'on va utiliser un multiplicateur à un étage avec deux axes dont le premier comporte une poulie A=26 cm de diamètre, et le deuxième comporte deux poulie B=5.5cm et C= 26cm, et la poulie de l'alternateur D=2.5 cm, ce qui nous fait un rapport de multiplication :

$$r = \frac{\text{Roues menantes}}{\text{Roues menées}} = \frac{A \times C}{B \times D} = \frac{26 \times 26}{5.5 \times 2.5} = 49.13$$

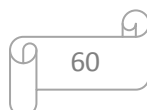
r: Rapport de multiplication de vitesse.

Ce qui satisfait largement la valeur du rapport qu'on recherche.

Nous avons coupé à l'aide d'une scie électrique un arbre en acier A60 de 50cm de longueur et de 30mm de diamètre, ensuite on charioté 10cm d'une extrémité de cet arbre afin de monter la poulie C dont l'alésage est de 25mm.

Pour monter la poulie B sur l'arbre on a réalisé à l'aide d'une fraiseuse une rainure de clavette.

Notre multiplicateur est schématisé dans la figure suivante :



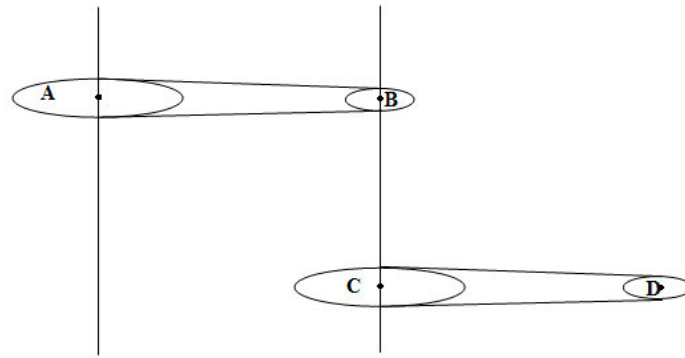


Figure III.7 : Schéma du multiplicateur de vitesse

La transmission du mouvement entre les poulies se fait au moyen de courroies.

Pour les poulies A et C nous les avons récupéré de deux machines à laver, et vu l'impossibilité de leurs faire une rainure de clavette alors on a fabriqué avec le tournage une bague avec épaulement qu'on a fixé sur la poulie avec des rivets, et sur l'arbre avec des vis de pression.



Figure III.8 : Poulie montée sur la bague de fixation

III.2.5 Paliers

Pour la mise en place des deux arbres tournants nous avons besoin de 4 paliers. Pour réaliser les paliers, nous avons pris un arbre en acier A40 de 70mm de diamètre et de 200mm de longueur et nous l'avons percé au moyen de tournage jusqu'à ce que nous aurons un

diamètre intérieur de 62mm, ensuite nous l'avons coupé en 4 bague pour nous servir comme palier.



Figure III.9 : Palier

III.2.6 Montage des roulements

Nous avons 3 roulements à billes et un roulement à rouleaux coniques.

Nous avons monté les roulements dans les paliers au moyen d'une presse de 60 tonnes.



Figure III.10 : Palier à roulement à rouleaux conique.



Figure III.11 : Palier à roulement à billes.

Ensuite, nous avons monté sur la partie basse de l'arbre principale un palier à roulement à rouleaux coniques pour mieux supporter le poids du rotor, et sur la partie haute nous avons monté un palier à roulement à billes. Tandis que sur l'arbre secondaire, nous avons monté les paliers à roulement à billes.



Figure III.12 : Arbre secondaire

Nous avons fixé sur le support des plaques en acier avec des boulons, qui vont servir comme support pour les paliers.



Figure III.13 : Support pour les paliers

Pour fixer l'alternateur sur le support de l'éolienne on a fabriqué la pièce suivante :



Figure III.14 : Support pour l'alternateur

Nous avons monté le tout sur le support de l'éolienne et nous avons obtenus la structure suivante :

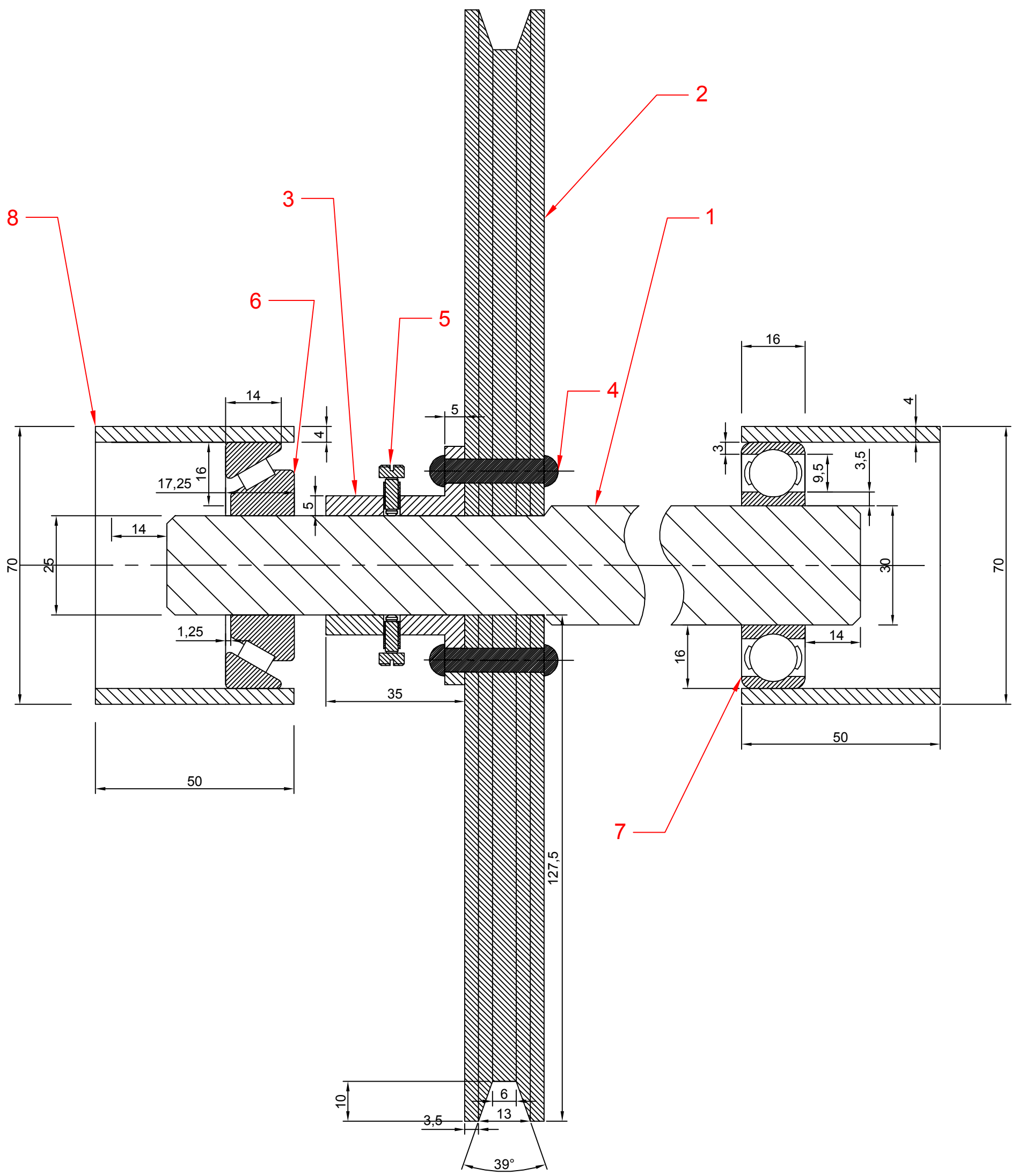


Figure III.15 : Eolienne Savonius

On remarque bien que les pales formant les deux étages sont décalées d'un angle de 90° entre elles pour assurer le démarrage quelque soit la direction du vent.

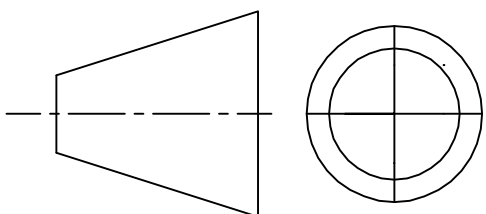
Conclusion

Au cours de la réalisation des composants de notre éolienne, nous avons utilisé plusieurs procédés (tournage, fraisage, soudage et le perçage...ect), ces procédés sont assurés par les machines présentes au sein du hall de technologie, ce qui nous a permet d'avoir un travail fini.

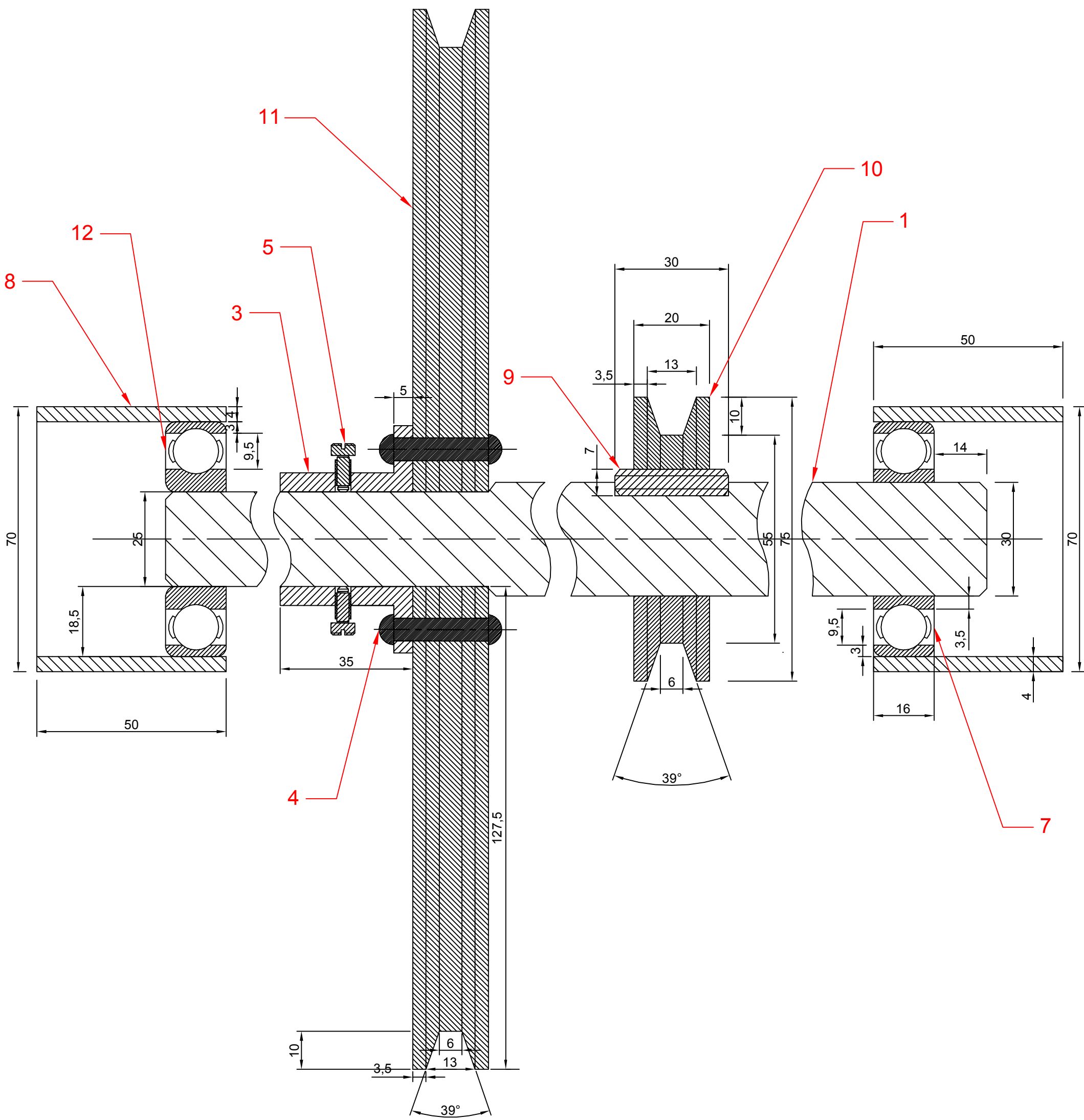


Echelle: $\frac{1}{2}$

UNIVERSITE DE BEJAIA

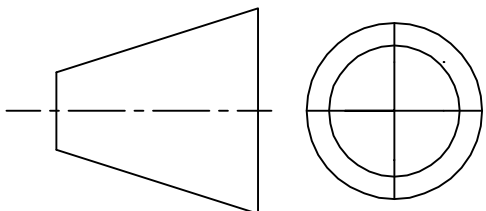


CONSTITUANTS DE
L'ARBRE
PRINCIPALE



Echelle: $\frac{1}{2}$

UNIVERSITE DE BEJAIA



CONSTITUANTS DE
L'ARBRE
SECONDAIRE

Nomenclature des dessins

REP.	NB.	DESIGNATION	MATIERE	REFERENCE
1	2	Arbre plein	Acier	A60
2	1	Poulie (A)	Aluminium	
3	2	Bague de fixation	Acier	A40
4	10	Rivet		
5	4	Vis de pression		
6	1	Roulement à rouleaux coniques		30305DJR
7	2	Roulement à billes		6206
8	4	Palier	Acier	A40
9	1	Clavette	Acier	
10	1	Poulie (B)	Acier	A40
11	1	Poulie (C)	Aluminium	
12	1	Roulement à billes		6305

Chapitre IV

Essais et

expérimentation

Introduction

Dans ce chapitre nous allons procéder à l'identification de notre alternateur, ensuite nous allons faire une étude expérimentale de notre éolienne en faisant des essais.

IV.1 Modifications sur l'alternateur

Pour procéder à l'identification de l'alternateur, nous avons retiré le pont redresseur PD3, et nous avons remplacé le circuit d'excitation qui comporte un régulateur électronique par un autre qui ne comporte pas de régulateur.

La rotation de l'éolienne est assurée par une soufflerie.

L'éolienne ne démarrait pas à des vents faibles à cause de l'arbre secondaire qui était mal fixé sur le support, et pendant la rotation, il cause des vibrations qui tendent à créer un couple résistant de démarrage trop élevé. Pour remédier à cet inconvénient, nous avons relié directement la poulie de l'arbre principale à celle de l'alternateur.

Le rapport de multiplication aura la valeur suivante :

$$r_m = \frac{26}{2.5} = 10.4$$

r_m : Rapport de multiplication modifié

Lors des premiers essais, pour une vitesse d'alternateur de 500 tr/min (vitesse de synchronisme) et une tension d'excitation de 12V, nous avons mesuré une tension alternative simple de 2.8V au stator.

Supposons que nous avons placé un redresseur PD3, alors nous obtenons la valeur de la tension de sortie en appliquant la relation suivante :

$$V_{chmoy} = \frac{3 \times \sqrt{6}}{\pi} \times V = \frac{3 \times \sqrt{6} \times 2.8}{\pi} = 6.55 V$$

Le résultat que nous avons trouvé n'est pas suffisant pour pouvoir charger une batterie de 12V.

Nous avons remarqué que chaque phase du stator est constituée de deux bobines en parallèle.

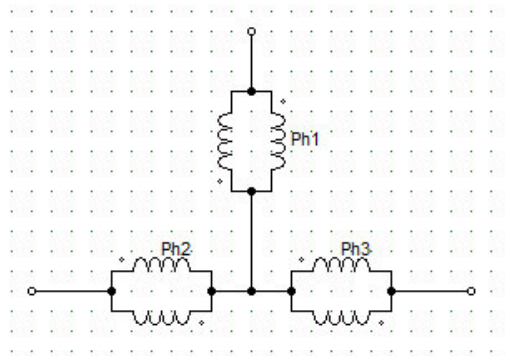


Figure IV.1 : Bobines du stator en parallèle

Pour doubler la tension de sortie, nous avons relié les deux bobines d'une phase en série.

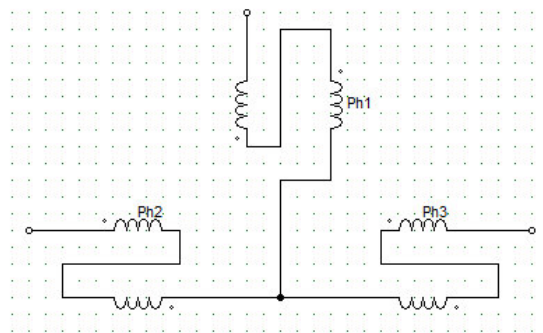


Figure IV.2 : Bobines du stator en série

Nous avons refait l'essai avec les mêmes données que précédemment et nous avons obtenu une tension de sortie de 5.7 Volts, avec un redresseur, on obtiendra une tension continue de 13.33 Volts ce qui est suffisant pour charger une batterie de 12 Volts.

IV.2 Méthodes d'identification de l'alternateur

L'identification consiste à déterminer les paramètres suivants :

- Les paramètres du stator : R_s , L_d et L_q
- Les paramètres du rotor : R_r , L_f
- La mutuelle stator/inducteur : M_f

Il existe plusieurs méthodes d'identification de l'alternateur parmi elles :

- Modèle de Behn-Eschenburg.
- Modèle de Potier.
- Modèle de Blondel.
- Essais classiques des machines synchrones.

Dans notre cas, on a choisi la méthode d'identification par essais classiques des machines synchrones.

IV.3 Essais classiques des machines synchrones

Cette méthode est très recommandée par la commission d'Electrotechnique international (C.E.I). Cette méthode consiste à faire les essais suivant : [18]

IV.3.1 Essais de Glissement

Le rotor de la machine synchrone est entraîné dans le sens de la f.é.m. tournante statorique à une vitesse très peu différente de celle du synchronisme. Le stator est branché sur une source triphasée équilibrée de fréquence nominale f et de tension composée réduite U_c .

Le circuit inducteur est maintenu ouvert ($I_f = 0$).

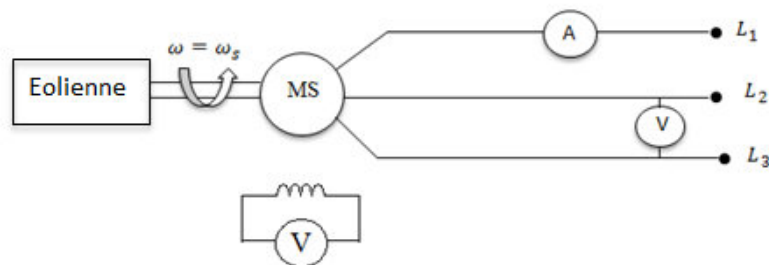


Figure IV.3 : Essais de glissement

Sur l'ampèremètre mesurant le courant parcourant une phase du stator, on remarque que ce dernier oscille entre deux valeurs extrêmes notées I_{min} , I_{max} .

Lorsque l'axe de la f.m.m coïncide avec l'axe des pôles de l'inducteur (position longitudinale) on écrit :

$$I = I_{min} \quad \text{et} \quad L_d = \frac{U_c}{\sqrt{3} \times \omega \times I_{min}}$$

Lorsque les axes sont en quadrature, on aura :

$$I = I_{max} \quad \text{et} \quad L_q = \frac{U_c}{\sqrt{3} \times \omega \times I_{max}}$$

L'alternateur comporte 6 paires de pôles, on alimente le circuit d'induit par une source triphasée de tension variable et de fréquence de 50 Hz.

Pour calculer la vitesse de synchronisme, on applique la relation suivante :

$$N_s = \frac{60 \times f}{p} = \frac{60 \times 50}{6} = 500 \text{ tr/min}$$

On a entraîné l'alternateur à une vitesse de 485 tr/min, ensuite on a relevé les valeurs suivantes :

$$I_{min} = 7.4 \text{ A}$$

$$I_{max} = 7.6 \text{ A}$$

$$U_c = 6 \text{ V}$$

Donc on aura :

$$L_d = \frac{U_c}{\sqrt{3} \times \omega \times I_{min}} = \frac{6}{\sqrt{3} \times 2 \times 50 \times \pi \times 7.4} = 1.49 \text{ mH}$$

$$L_q = \frac{U_c}{\sqrt{3} \times \omega \times I_{max}} = \frac{6}{\sqrt{3} \times 2 \times 50 \times \pi \times 7.6} = 1.45 \text{ mH}$$

IV.3.2 Essai en alternateur à vide

Cet essai permet de déterminer la mutuelle inductance M_f entre le stator et l'inducteur. La machine est entraînée à la vitesse de synchronisme. On relève la caractéristique de magnétisation $E_v = f(I_{ex})$ de l'alternateur :

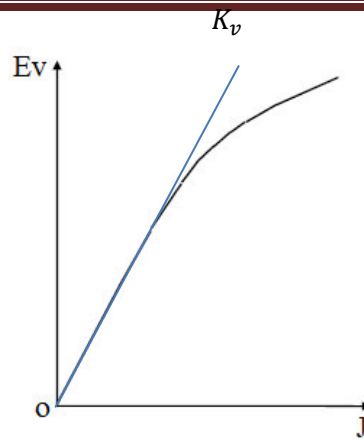


Figure IV.4 : Caractéristique à vide

Comme il est de coutume d'établir des modèles mathématiques des machines électriques fonctionnant loin de la saturation, on peut écrire :

$$M_f = \frac{K_v}{\omega}$$

Avec :

K_v : Pente de la partie linéaire de la caractéristique.

En réalisant cet essai, on a relevé les valeurs suivantes :

$I_{ex}(A)$	0.3	0.85	1.25	1.6	2.4	2.75	3.1
$E_v(V)$	1.05	2.65	3.5	3.9	4.4	4.75	5

Tableau IV.1 : Variation de la tension à vide en fonction du courant d'excitation.

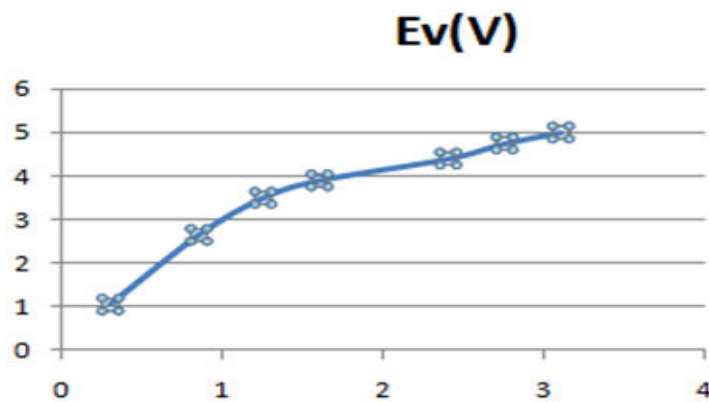


Figure IV.5 : Courbe $E_v = f(I_{ex})$

On calcule la pente de la partie linéaire de la caractéristique à vide :

$$K_v = \frac{2.65 - 1.05}{0.85 - 0.3} = 2.91$$

Donc nous aurons la valeur de la mutuelle stator/inducteur :

$$M_f = \frac{K_v}{\omega_s} = \frac{2.91}{2 \times 50 \times \pi} = 9.26 \text{ mH}$$

IV.3.3 Mesure en courant continu

La mesure en courant continu permet d'avoir les résistances des enroulements accessibles à la mesure en l'occurrence la résistance d'une phase du stator R_s et celle du circuit inducteur R_r .

Pour déterminer les résistances rotorique et statorique R_r et R_s respectivement, on procède à la méthode voltampère-métrique:

- On alimente une phase du stator grâce à une source de tension continue.

Vu que la résistance du stator est relativement faible, on réalise le montage aval suivant:

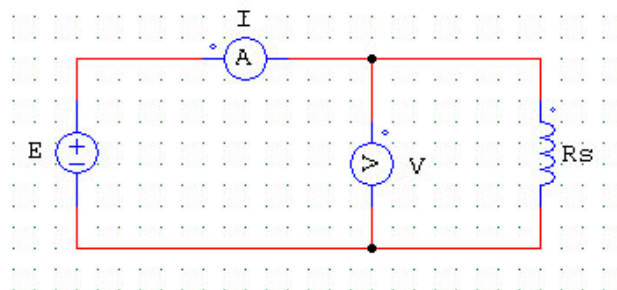


Figure IV.6 : Montage aval pour l'induit

On relève le courant et la tension aux bornes de chaque phase :

a. Phase 1 :

I(A)	0.6	1.3	2.5	3.4
V(V)	0.07	0.15	0.28	0.38

Tableau IV.2 : Variation du courant en fonction de la tension de la phase 1.

En appliquant la loi d'ohm $R_s = \frac{V}{I}$, on détermine la résistance.

On calcul donc la moyenne des résistances trouvées, et on trouve :

$$R_{s1} = 0.1139 \Omega$$

b. Phase 2 :

I(A)	0.6	2.7	4	5
V(V)	0.06	0.3	0.45	0.52

Tableau IV.3 : Variation du courant en fonction de la tension de la phase 2.

Avec la même méthode, on trouve :

$$R_{s2} = 0.1069 \Omega$$

c. Phase 3 :

I(A)	0.9	1.5	3	5
V(V)	0.09	0.2	0.3	0.55

Tableau IV.4 : Variation du courant en fonction de la tension de la phase 2.

Avec la même méthode, on trouve :

$$R_{s3} = 0.1108 \Omega$$

Donc : $R_s = \frac{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}}{3} \Rightarrow R_s = 0.1105 \Omega$

- Vu que la résistance de l'inducteur est relativement élevée, on réalise donc le montage amont suivant :

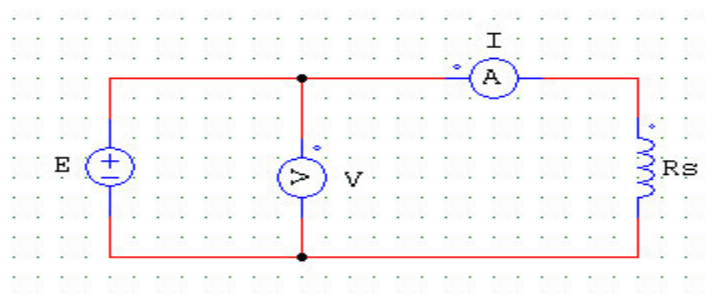


Figure IV.7 : Montage amont pour l'inducteur

On relève les valeurs du courant et de la tension :

I(A)	0.23	0.44	0.57	0.81
V(V)	0.7	1.5	1.9	2.7

Tableau IV.5 : Variation du courant en fonction de la tension du rotor.

On calcul donc la moyenne des résistances trouvées, et on trouve :

$$R_r = 3.2797 \Omega$$

Par ailleurs, la mesure en courant alternatif donne au niveau de l'inducteur :

$$L_f = \frac{1}{\omega} \times \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_f^2}$$

Nous avons relevé les valeurs suivantes :

I(A)	0.13	0.17	0.22
U(V)	9	12	15
$Z_r(\Omega)$	69.23	70.58	68.18

Tableau IV.6 : Mesure de l'inductance rotorique

$$Z_{rmoy} = \frac{69.23 + 70.58 + 68.18}{3} = 69.33 \Omega$$

Donc :

$$L_f = \frac{1}{\omega} \times \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_f^2} = \frac{1}{2 \times \pi \times 50} \times \sqrt{\frac{9^2}{0.13^2} - 3.28^2} = 220 \text{ mH}$$

IV.3.4 Essai en charge

Essai 1 :

$$I_{ex} = cte \text{ et } \omega = cte.$$

L'alternateur triphasé est entraîné à vitesse constante. Il alimente une charge triphasée équilibrée. L'intensité I_{ex} du courant d'excitation est maintenue constante, le déphasage tension/courant est imposé par la charge (dans notre cas, charge résistive).

Nous avons réglé la vitesse de rotation à 200 tr/min, et nous avons fixé le courant d'excitation à 3A, ensuite, nous avons relevé les valeurs de la tension simple de charge et du courant suivantes :

V _{ch} (V)	2.5	2.4	2.25	2	1.85	1.7	1.6	1.4	1.2	1.05	0.9
I _{ch} (A)	0.5	0.51	0.61	0.68	0.72	0.75	0.82	0.85	0.95	1	1.05

Tableau IV.7 : Variation de la tension de charge en fonction du courant de charge.

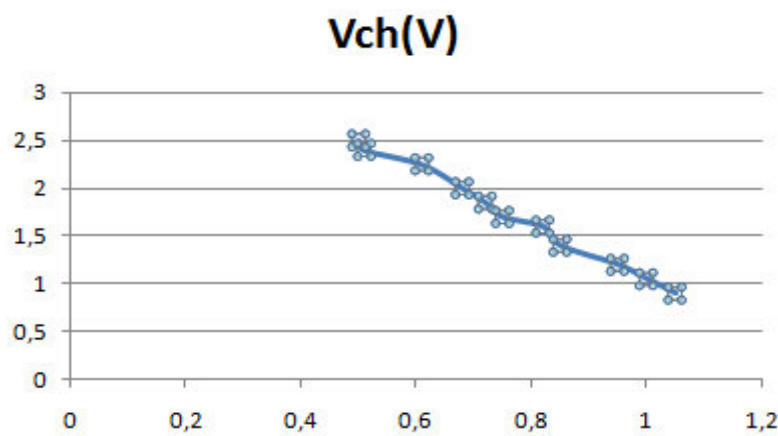


Figure IV.8 : Caractéristique $V_{ch} = f(I_{ch}), I_{ex}$ et ω constantes

On remarque qu'en diminuant la charge, le courant augmente et la tension diminue.

Essai 2 :

$V_{ch} = cte$ et $\omega = cte$.

Dans cet essai, on fait varier la charge et le courant d'excitation et on maintient la vitesse de rotation constante et la tension de la charge constante.

On a fixé la vitesse de rotation à 200 tr/min et la tension de la charge à 2.5V, et on a relevé les valeurs suivantes :

I _{ex} (A)	1.4	2.7	3.1	3.4	3.6
I _{ch} (A)	0.38	0.5	0.55	0.7	0.75

Tableau IV.8 : Variation du courant d'excitation en fonction du courant de charge.

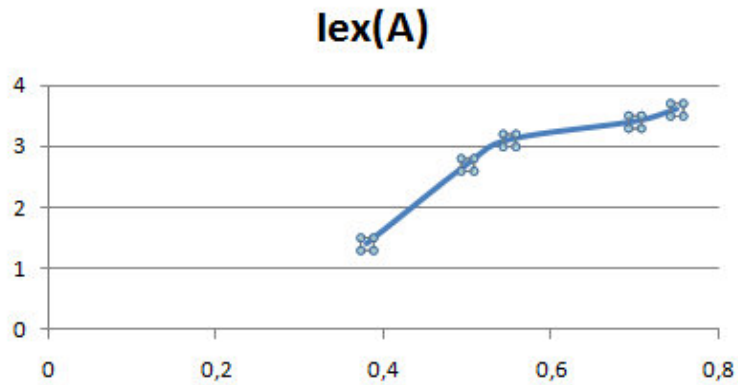


Figure IV.9 : Caractéristique $I_{ex} = f(I_{ch})$

Pour maintenir la tension constante en variant la valeur de la charge, il faut qu'on augmente le courant d'excitation.

Conclusion

Dans le but de tester notre éolienne et voir son comportement, nous l'avons exploité pour procéder à l'identification de l'alternateur. Les caractéristiques relevées sont similaire à celle rencontrées dans la théorie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de l'éolien est présenté dans le premier chapitre. La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ de matériaux de construction et de l'électronique de puissance. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie motrice de développement durable.

Dans la partie principale de notre travail, nous avons procédé à la réalisation du système éolien notamment la structure porteuse, le système est relié à un alternateur à griffes pour la transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique.

La partie suivante du projet concerne la réalisation de la turbine éolienne. Dans ce cadre nous avons réalisé la structure porteuse qui supporte toute l'installation, ensuite nous avons réalisé les pales qui sont l'élément clé de notre système, avant de les avoir fixé sur un arbre plein qui est lié à la structure porteuse par l'intermédiaire de deux paliers à roulement et ca, après la mise en place du système de multiplication de vitesse, qui se compose de trois poulies avec une liaison à base de courroies.

Après avoir achevé notre réalisation, nous avons entamé la partie expérimentale dans une soufflerie où nous avons identifié l'alternateur et effectué quelques essais sur la turbine réalisée.

Comme perspectives, nous proposons l'allégement du rotor en utilisant un arbre creux et des pales en matériaux composite.

Pour l'atténuation du couple résistant au démarrage, nous proposons une bonne fixation de l'arbre secondaire afin de minimiser les vibrations.

L'utilisation d'une plus grande poulie sur l'arbre principale rend inutile la présence de l'arbre secondaire.

Pour la stabilisation de la vitesse de rotation de l'éolienne, nous proposons de mettre un régulateur mécanique de vitesse.

On propose l'insertion du régulateur et du redresseur dans l'alternateur pour avoir l'auto excitation de ce dernier.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] LE GOURIERES Désiré ; « ENERGIE EOLIENNE, théorie, conception et calcul pratique des installations » ; livre.
- [2] « <http://www.info-éolien.com> » ; Site internet.
- [3] MEBARKI M'barek et KERBAL Salih ; « Etude aérodynamique d'une éolienne à axe horizontal » ; Mémoire de fin d'étude ; université A.MIRA.
- [4] MIREKI Adam ; « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » ; thèse de doctorat ; l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) ; 2005.
- [5] Frédéric POITIERS ; « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » ; thèse de doctorat ; université de Nantes ; 2003.
- [6] REDJEM Radia ; « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » ; mémoire de fin d'étude ; université mentouri de Constantine ; 2009.
- [7] EL AIMANI Salma ; « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » ; thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (U S T L).
- [8] E. Hau ; « Wind turbines : Fundamentals, technologies, applications, economics » Deuxième édition ; livre ; 2006.
- [9] RIOLET Emmanuel ; « Le mini-éolien » ; livre ; 2010.
- [10] HLADIK Jean ; « ENERGETIQUE EOLIENNE, chauffage éolien-Production d'électricité-Pompage » ; mémoire de fin d'étude.
- [11] ABDELLI Abdenour ; « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » ; thèse de doctorat ; institut national polytechnique de Toulouse ; 2007.
- [12] MEKKAOUI Naima ; « Contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentée » ; Mémoire de magister ; Université de Batna ; 2003.

Références bibliographiques

[13] AITMEZIANE Samir ; « modélisation et simulation d'une centrale éolienne » ; Mémoire de fin d'étude.

[14] ALBERT Laurent ; « modélisation et optimisation des alternateurs à griffes – Application automobile » ; thèse de doctorat ; l'institut national polytechnique de Toulouse ; 2004.

[15] TAMTO MEDAM Yolande ; « détermination des paramètres d'une machine à griffes, Application au domaine automobile » ; Thèse de doctorat ; institut polytechnique de Grenoble ; 2008.

[16] BOUARROUDJ Lilya ; « contribution à l'étude de l'alternateur à griffes, application au domaine automobile » ; Thèse de doctorat ; institut national polytechnique de Grenoble ; 2005.

[17] D.BENABDESSELAM ; « électricité automobile » ; Livre.

[18] R.ABDESSEMED et M.KADJOUJ ; « Modélisation des machines électriques » ; presse de l'université de Batna ; 1997.