

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin de cycle

En vue d'obtention du diplôme de Master :

Filière: électrotechnique

Option: automatisme industriel & commande électrique

Thème:

*Étude et mise en œuvre d'une éolienne à axe
horizontale (essais expérimentaux et équilibrage)*

Présenté par:

Meddour abderrazak

Moussaoui yougourta

Promoteur :
Y.Mebarki

Année Universitaire : 2019/2020

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur l'éolienne	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique.....	3
I.3 Généralité sur les éoliennes	3
I.3.1-Définition d'une éolienne :	3
I.3.2 Les types des éoliennes	4
I.3.3 On distingue deux grands types d'éoliennes.....	4
a) Eolienne à axe vertical.....	4
b) Eolienne à axe horizontal	6
I.3.4 Définition d'un aérogénérateur à axe horizontal.....	7
I.4 Constituants de l'éolienne.....	8
I.5 : Zones de fonctionnement d'une éolienne	10
I.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	11
I.7 Conclusion	12
Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	
II.1 Introduction	13
II.2 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	13
II.2.1 Loi de betz	13
II.2.2 Model de multiplicateur.....	15
II.3 Méthode de recherche du point maximum de puissance.....	17
II.3.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.....	18
II.3.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse	20
II.3.3 Calcul du correcteur de la vitesse de la turbine	21
II.4 Résultats de simulation.....	22
II.4.1MPPT sans asservissement.....	22
II.4.2 MPPT avec asservissement	23
II.5 Type de machine électrique.....	23
II.5.1 Modélisation de la machine synchrone a aimant permanent	24
II.5.2 Les hypothèses simplificatrices	24
II.5.3 Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanents.....	25

Sommaire

II.5.4 Equations électriques et magnétiques de la machine	25
II.5.5 Circuit équivalent de la MSAP	26
II.5.6 - Le ponts de redressement triphasé.....	28
II.6 Simulation de la chaine globale de conversion	29
II.6.1 Turbine	29
II.6.2 Machine synchrone à aimant permanent	30
II.6.3 - Le ponts de redressement triphasé.....	30
II.6.4 Résultats de simulation	31
II.6.5 Vitesse du vent	31
II.7 Conclusion	33
Chapitre III : Equilibrage et essais experimentaux	
III.1. Introduction	35
III.2 Caractéristique de l'éolienne à étudier	35
III.2.1 Dimensionnement des pales	35
III.2.2 Le Mat.....	36
III.2.3 Système poulie courroie.....	36
III.2.4 Alternateur	37
III.3 Equilibrage de l'éolienne	38
III.3.1 Equilibrage statique.....	38
III.3.2 Equilibrage dynamique.....	38
III.4 Caractérisation dynamique	38
III.4.1 Variation de la puissance $P_{\text{éolienne}}$ en fonction de L'angle d'inclinaison des pales	40
III.4.2 Tension, obtenue à partir du vent en fonction de La vitesse et de L'angle d'inclinaison des pales	42
III.4.3 Tension obtenue pour chaque angle d'inclinaison des pales.....	42
III.5 Etude comparatif entre les résultat pratiques et la simulation.....	45
III.6 Conclusion.....	46
Conclusion générale	48
Reference bibliographies.....	49

Table des figures

Figure I.1: Les différentes formes d'éoliennes Darrieus.....	5
Figure I.2: Les différentes formes d'éoliennes pouvant être conçues en utilisant le principe de Fonctionnement de Darrieus	5
Figure I.3: L'éolienne « amont »	7
Figure I.4 L'éolienne « aval ».....	7
Figure. I.5 : Constitution d'une éolienne tripale	8
Figure. I.6 Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	11
Figure II.1 : Eolienne simplifiée	13
Figure II.2 : Coefficient de puissance C_p	14
Figure II.3 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné	15
Figure II.4 : Schéma de la turbine éolienne	16
Figure. II.5 : Caractéristique de l'éolienne dans le plan vitesse de rotation.....	17
Figure. II.6 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans Asservissement de la vitesse	19
Figure. II.7 : schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse.....	20
Figure. II.8 : Régulation de la vitesse	22
Figure II.9 : La vitesse de la turbine	22
Figure II.11 : La vitesse spécifique (λ).	22
Figure II.13 : La vitesse de la turbine	23
Figure II.14 Le Coefition de puissance (C_p).....	23
Figure II.15 : La vitesse spécifique (λ)..	23
Figure II.16 Le couple de la turbine.....	23
Figure II.17 : Représentation symbolique de la MSAP	24
Figure II.18 : Représentation d'une MSAP dans le repère (abc).....	25
Figure II.19 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park	26
Figure II.20 : circuit équivalent de MSAP.....	28
Figure II-21 : Redresseurs triphasés. (a) P3. (b) PD3	29
Figure II-22 : Structure globale de la chaîne de conversion	29
Figure II-22 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne (Matlab – Simulink).	30
Figure II 23 : Machine synchrone à aimant permanant.	30

Figure II-24: Le schéma redresseur a diode	31
Figure II-25 : Vitesse du vent V_v	30
Figure II-26 : vitesse de la turbine	32
Figure II-27 : Tension composée de la génératrice.....	32
Figure II-28 : Tension redresser	33
Figure III.1: La Dimension de la pale	35
Figure III.2 : Mat éolienne.....	36
Figure III.3: Schéma cinématique	36
Figure III.4: alternateur a griffes« Volvo 20466316 ».....	37
Figure III.5: La puissance en fonction de la vitesse du vent	40
Figure III-6 : Puissance théorique disponible pour notre d'éolienne.....	41
Figure III-7 : Tension de la sortit de l'alternateur pour $\beta = 0$	42
Figure III-8 Tension relever a la sortit de l'alternateur pour $\beta = 2$	43
Figure III-9 Tension relever a la sortit de l'alternateur pour $\beta =$	44
Figure III-10 Tension relever a la sortit de l'alternateur pour $\beta = 4$	45
Figure III-11 résultat pratique et théorique a la sortit de l'alternateur pour $\beta = 0$	46

Table des tableaux

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical.....	6
Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale	7
Tableau I.3 : Nom des différents composants d'une éolienne.....	9
Tableau III-1: La puissance du vent en fonction de la vitesse.....	41
Tableau III-2: La puissance du vent en fonction de la vitesse et de l'angle d'inclinaison.	43
Tableau III-3 Relevé de tension à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 0$	44
Tableau III-4 Tensions à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 2$	45
Tableau III-5 de l'alternateur pour $\beta = 4$	46
Tableau III-6 Tension à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 6$	46

Glossaire

- A..... La valeur moyenne de la vitesse du vent.
- C_pCoefficient de puissance de la turbine.
- C_{popt}Coefficient de puissance optimal de la turbine.
- λ La vitesse spécifique.
- λ_{opt} La vitesse spécifique optimale.
- Ω La vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice [rad/s].
- R Le rayon de la turbine [m].
- m.....La masse de l'air [Kg].
- V_v La vitesse du vent [m/s].
- P_v La puissance du vent [W].
- P_{max} La puissance maximale qu'on peut extraire du vent [W].
- $P_{eolienne}$ La puissance éolienne [W].
- P_{mec}La puissance mécanique [W].
- ρ La densité de l'air [Kg/m³]
- J Inertie de la turbine [Kg.m²].
- f.....Coefficient de frottement dynamique [kg/m²].
- T_{em} Le couple électromagnétique [N.m].
- T_t Couple développé par la turbine sous l'action du vent [N.m]
- Nomenclature et Notation
- T_{em}le couple électromagnétique développé par la génératrice
- GGain du multiplicateur de vitesse.
- V_{sabc} Les tensions des différentes phases statorique dans le repère classique [V].
- i_{sabc} Les courants des différentes phases statorique dans le repère classique [A].
- φ_{sabc}Les flux des différentes phases statorique dans le repère classique [Wb].
- Ω_t la vitesse de la turbine

Glossaire

R_s La résistance des phases statoriques.

φ_e représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.

$I_{sd}I_{sq}$ Courants statoriques des le repère de Park [A].

$V_{sd}V_{sq}$ Tensions statoriques des le repère de Park [V].

L_sInductance cyclique statoriques [H].

P Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.

SSurface active de la turbine ($S = \pi R^2$) [m²].

ω Pulsation des tensions [rad/s].

θL'angle de déphasage entre le rotor et le stator.

$P(\theta).P(\theta)^{-1}$La matrice de Park respectivement direct et inverse.

L_dInductance direct de la phase statorique dans le repère de Park [H].

L_qInductance en quadrature de la phase statorique dans le repère de Park. [H]

i_{dq} Les courants direct et en quadrature de phase statorique dans le repère de Park.

V_{dq} Les tensions de la phase statorique dans le repère de Park.

ξ : Coefficient d'amortissement.

τ_m :Constante de temps du système à régler.

MSAP Machine synchrone à aimant permanent.

GSAP Génératrice synchrone a aimant permanent.

MPPT Maximization Power Point Tracking.

VAWT les aérogénérateurs à axe vertical

HAWT les aérogénérateurs axe horizontal

FEM Force électromotrice

FMM Force magnétomotrice

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Le recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont les plus répons pour la production d'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO₂.

Les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs Pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles.

Au cours des deux dernières décennies il y a eu de nombreux progrès technologiques dans l'industrie éolienne, qui ont fait d'elle une source d'énergie plus fiable et plus rentable.

En jours actuels, la production d'énergie éolienne est commercialisable et les systèmes de puissance sont de plus en plus pénétrables en cette dernière.

Notre travail consiste à équilibrer une petite éolienne a axe horizontale déjà réalisée, la mettre en œuvre en effectuant des essais expérimentaux, nous avons ainsi simulé matlabs Simulink toute l'installation ensuite nous avons comparé les résultats .

Notre travail est composé de trois chapitres répartir comme suit :

Pour entamer cette étude, nous avons réparti notre travail en trois chapitres, résumés comme suit:

Le premier chapitre contient quelques notions fondamentales sur l'énergie éolienne. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes, et leur constitution. Nous avons abordé les différentes définitions des constituants qui rentrent en jeu ainsi que les différentes zones de fonctionnement et le système de sécurité mécanique mit en place.

Dans le deuxième chapitre, nous l'avons consacré à l'étude et la modélisation de la chaîne de conversion avec une architecture choisie comme machine synchrone à aimants permanents pour des raisons de similitude avec l'alternateur à griffe qui est utilisé dans notre éolienne.

Le dernier chapitre, nous l'avons présenté sous forme d'interprétation des résultats expérimentaux obtenus dans une région très venteuse à une vitesse moyenne de 5 ms^{-1} ainsi à l'équilibrage statique et dynamique les aubages de la turbine.

Enfin on termine par une conclusion général .

1.1 Introduction

L'énergie éolienne, considérée comme source non polluante, est une des options les plus durables parmi les possibilités future. En fait, les capteurs éoliens sont classés par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent.

L'utilisation de l'énergie éolienne n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle un potentiel alternatif au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie de la consommation croissante en énergie [1]

1.2 Historique

Le nom "éolienne" vient du nom du dieu du vent grec, Eole. La maîtrise du vent par l'Homme s'est faite au cours des siècles. En l'an 4000 avant J-C, les Chinois s'en servaient déjà pour la navigation. Les premiers dispositifs fonctionnant à l'aide du vent sont apparus dans l'Empire Perse, pour irriguer les terres cultivés [2], ainsi que pour moulin le grain. Les croisades ont apporté en Europe ce savoir-faire vers 1180, le développement de l'agriculture entraîna une utilisation massive des moulins à vent en Europe de l'ouest. Aux États-Unis, le développement de l'éolienne pour pomper l'eau a été un facteur déterminant permettant l'exploitation de larges étendues. L'éolienne multi-pale placée au sommet d'une tour en treillis bois ou acier fut pendant de nombreuses années, un trait majeur du paysage de l'Amérique rurale. L'éolienne moderne commença à être développée au début des années 1980. Et en 1888, Charles F. Brush créa la première éolienne. En construisant une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs [3].

Depuis la technologie n'a cessé de s'améliorer de nombreuses recherches sont actuellement en cours pour permettre à l'énergie éolienne de pouvoir jouer le rôle qui l'attend dans les prochaines années [4].

1.3 Généralité sur les éoliennes :

1.3.1-Définition d'une éolienne :

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique combinée à la turbine éolienne [5]. Cette conjonction mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre d'ampleur, soit accompli par le médiateur d'un multiplicateur dans le cas inverse. Enfin il existe différents modèles d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des foyers isolés.

Le système de conversion éolien est également des sièges de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion [6].

1.3.2 Les types des éoliennes :

On distingue les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes off-shore (sur la mer). Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses.

- Les éoliennes à axe horizontal
- Les éoliennes domestiques
- Les éoliennes à axes verticaux
- Les hydroliennes
- Eolienne de pompage

1.3.3 On distingue deux grands types d'éoliennes :

- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes à axe horizontal

a) Eolienne à axe vertical :

Ce type d'éolienne est principalement érigé près du sol ce qui signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain ou aux bâtiments en amont de la machine).

Ces paramètres vont réduire grandement l'efficacité de l'éolienne [7].

-Eoliennes de type Darius :

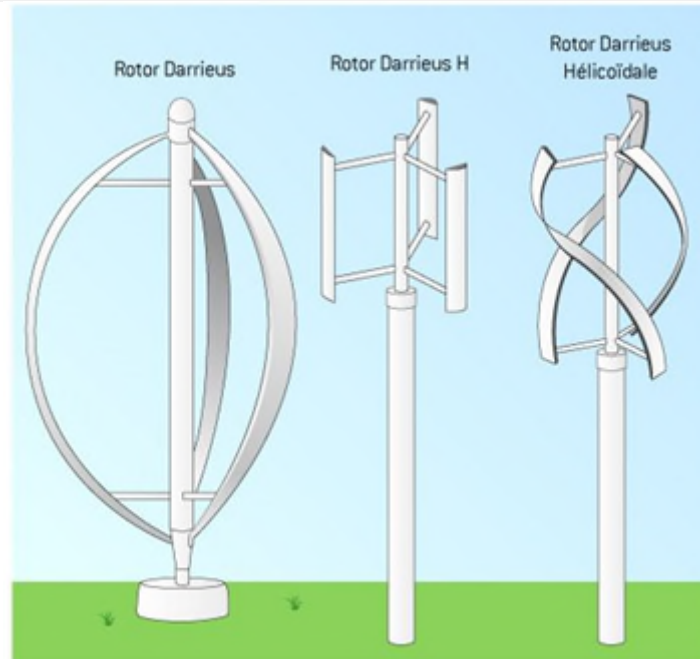


Figure I.1: Les différentes formes d'éoliennes Darrieus.

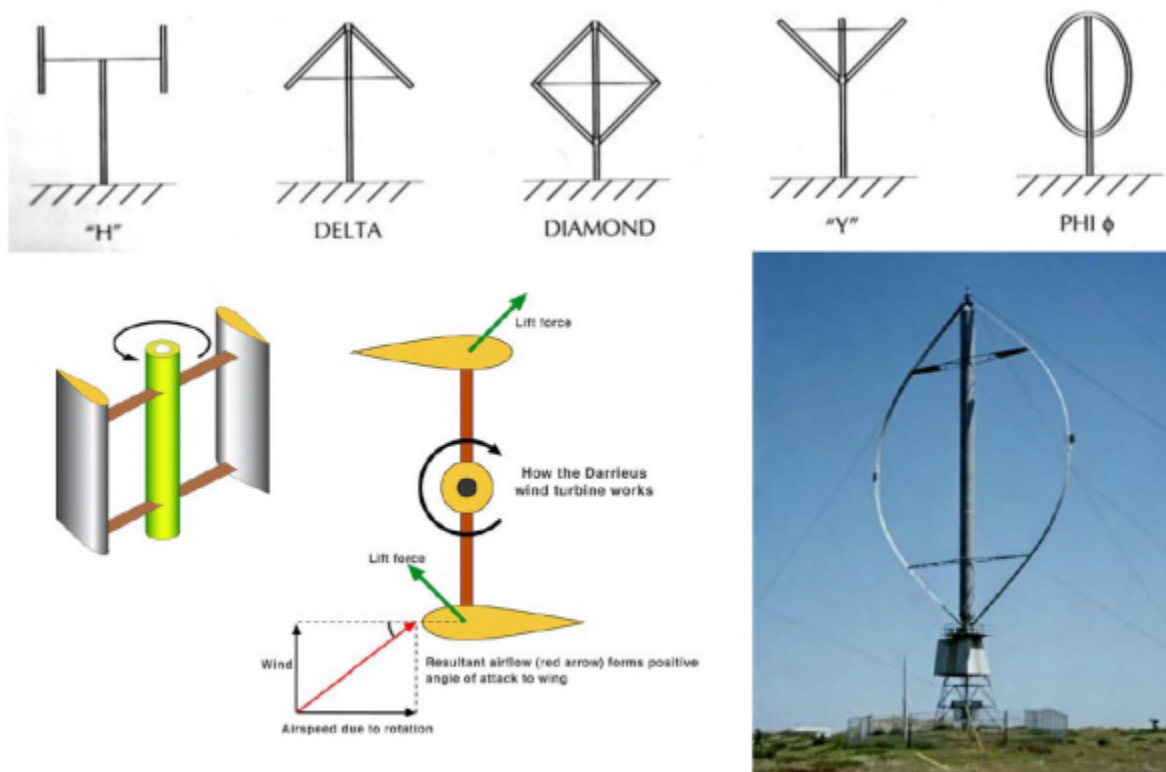


Figure I.2: Les différentes formes d'éoliennes pouvant être conçues en utilisant le principe de Fonctionnement de Darrieus

Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical sont présentés dans le tableau Ici – dessous :

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe vertical.[8]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol. • Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor. • Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. • La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief • Leur implantation au sol exige l'utilisation des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

b) Eolienne à axe horizontal :

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent. Deux types de configuration sont regroupés sous la terminologie HAWT (horizontal axis Wind turbine) : les éoliennes « amont » et « aval ». Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients.

Le principal intérêt de la formule « aval » est que la machine peut s'orienter naturellement en lacet (autour de l'axe vertical de la tour). En effet, en inclinant les pales vers l'arrière, elles forment en rotation un cône : la surface latérale virtuelle ainsi créée fait alors office de gouvernail. Par ailleurs, dans la configuration aval, la tour perturbe fortement l'écoulement de l'air (effet dit de masque) : les pales, qui passent dans ce sillage, subissent à chaque tour des efforts répétés, source de vibrations et de fatigue. On doit alors modifier l'attache des pales au sein du moyeu pour que le rotor se comporte dans son ensemble comme un balancier et absorbe ces perturbations.

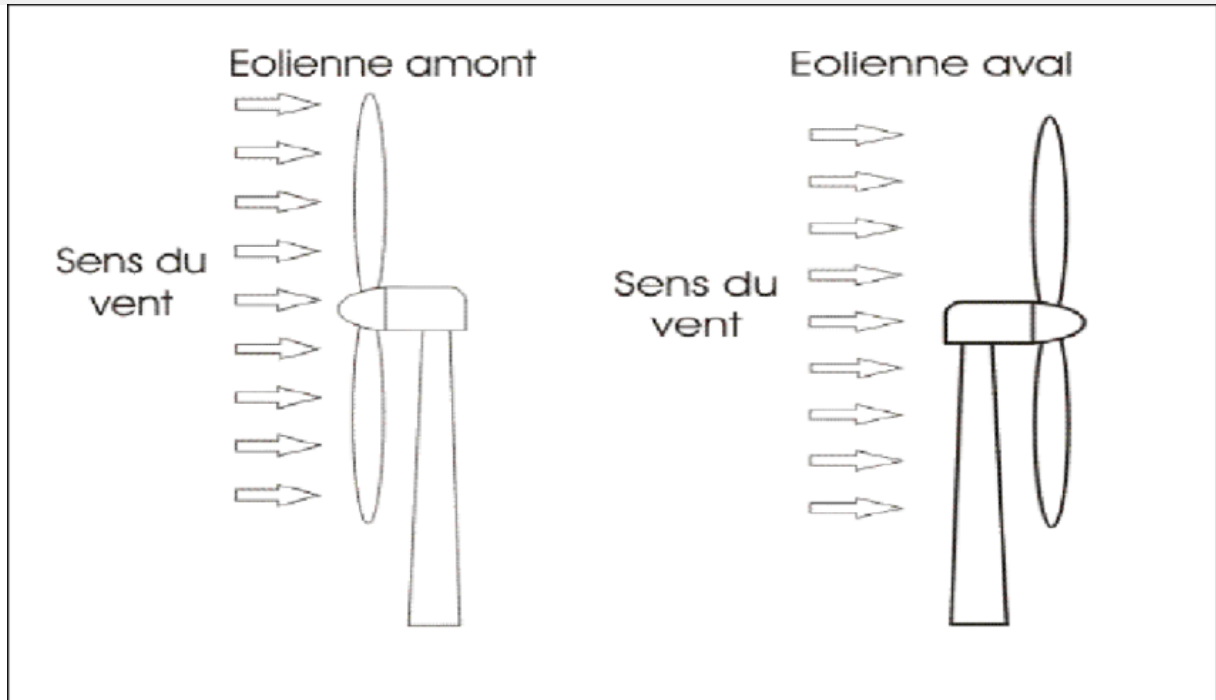


Figure I.3: L'éolienne « amont » Figure I.4: L'éolienne « aval »

Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontal sont présentés dans le tableau I.2 ci-dessous :

Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale. [8]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical. • Cette structure capte le vent en hauteur donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage de sol. • Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût de construction très élevé • L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident

I.3.4 Définition d'un aérogénérateur à axe horizontal

Une éolienne est un dispositif permettant d'utiliser l'énergie du vent. Elle convertit l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique. Elle est composée de pâles en rotation autour d'un rotor et actionnées par le vent. Les éoliennes sont généralement

utilisées pour produire de l'électricité et pour le pompage d'eau, et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables.

Exposons les définitions des deux termes suivants, qui seront plus ou moins rencontrés au fil de l'avancement de ce mémoire, données par « l'association Française de Normalisation » [9].

- ❖ AEROMOTEUR (ou Eolienne) : Moteur rotatif actionné par le vent.
- ❖ AEROGENERATEUR : Groupe constitué par une génératrice électrique entraînée par un aéromoteur.
- ❖

I.4 Constituants de l'éolienne

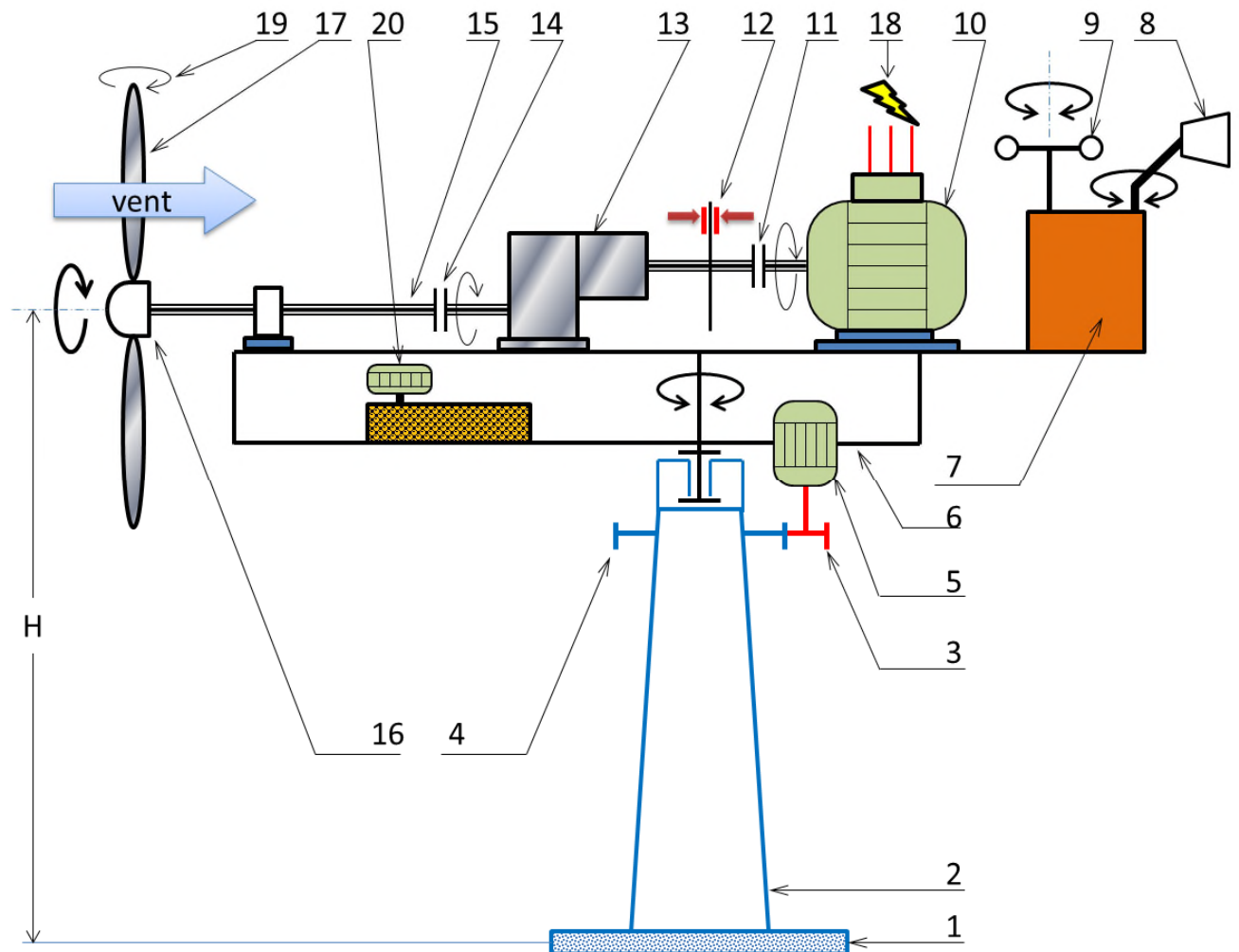


Figure. II.1 : Constitution d'une éolienne triplate.

Tableau I.3 : Les constituants d'une éolienne. [8]

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité centrale	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	L'alternateur	20	Groupe hydraulique

1-La fondation : c'est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne

2-La tour (le mat) : la pièce la plus imposante de l'éolienne est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccords nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Sa hauteur peut atteindre plus de 100 mètres, soit la hauteur d'un édifice de 20 étages. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.

3- Pignon d'entraînement de la nacelle : il s'agit de courroie de transmissions

4-Roue dentée liée à la tour : c'est un disque d'acier comportant des dents à sa périphérie

5-Le système de direction : est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence l'état de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre la vitesse.

6- La nacelle : contient les principales composantes d'une éolienne, comme le multiplicateur et la génératrice. À l'avant de la nacelle, nous trouvons le rotor de l'éolienne, c'est-à-dire les pales et le moyeu.

7-L'armoire de couplage au réseau électrique : transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau.

8- La girouette : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.

9-L'anémomètre : mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.

10-L'alternateur : machine électromécanique fournissant des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation

11-L'arbre rapide : tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

12-Le frein : permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.

13-Le multiplicateur : relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation. La génératrice : est l'endroit où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique. L'arbre lent : son rôle est de relié le moyeu du rotor au multiplicateur.

14-Le rotor : (les pales et le moyeu). Il tourne assez lentement, environ 16 tours par minute. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins en cas de vents violents.

15- L'arbre lent ou arbre primaire relie au multiplicateur qui tourne lentement

16-Le moyeu : est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine.

18-Un réseau électrique c'est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique

17-Les pales : les pales du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

19-Système de régulation du pas des pales :Le principe est de **modifier l'angle des pales** par rapport au vent de manière à diminuer la vitesse de rotation des pales par une moindre prise au vent

20- Groupe hydraulique :Le groupe hydraulique central fournit la pression requise pour les composants hydrauliques comme des freins, le système pitch, les grues de service et le rotor lock

I.5 : Zones de fonctionnement d'une éolienne

On peut définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent figure (II.5)

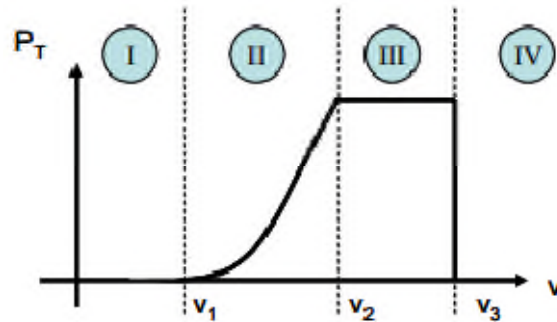


Figure. I.5 Zones de fonctionnement d'une éolienne

V_1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

V_3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s [10].

Zone I : $V < V_1$

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_1 < V < V_2$

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $V_2 < V < V_3$

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de turbine P_n . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Zone IV : $V > V_3$

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée (les pales de la turbine sont mises en drapeaux $\beta = 90^\circ$). Donc la puissance extraite est nulle.

I.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne des vents forts et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_{max} qui pourrait endommager la turbine.

Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on s'intéressera pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir :

❖ Le système « pitch »

La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "pitch control", consiste à faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance

pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort.

❖ Le système « stall »

Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "stall control", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique [10]. En comparaison avec le pitch, le stall a pour avantage l'absence des pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor (système de contrôle d'angle de calage). La construction est donc plus simple et moins coûteuse. Par contre la puissance active n'est pas contrôlable.

❖ Le système « stall actif »

Le système "stall actif" est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pâles étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux [10].

I.7 Conclusion

Durant ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements, leur avantage et leur inconvénient et des notions fondamentales sur l'aérogénérateur à axe horizontal, on était évoqué en passant par les différentes zones de fonctionnements avec la régulation mécanique.

II.1 Introduction

La modélisation consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement, faciliter son dimensionnement et éventuellement simuler son évolution dans le temps sous un logiciel, qui dans notre cas est la bibliothèque Simulink de Matlab.

Dans ce chapitre, nous allons développer des équations mathématiques qui pourront représenter au mieux le modèle réel de la chaîne de conversion. Notre chaîne de conversion est composée d'une turbine éolienne associée à une génératrice synchrone à aimant permanent qui est similaire à notre alternateur en imposant un flux stable suivi d'un redresseur à diode double alternance. Le but de cette modélisation consiste à simuler le comportement de notre éolienne à axe horizontal déjà réalisé pour ensuite comparais les résultats à ceux de la pratique.

II.2 ENERGIE CINETIQUE DU VENT – CONVERSION EN ENERGIE MECANIQUE

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique.

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [1].

II.2.1 LOI DE BETZ

Etudions l'éolienne présentée (figure II.1). D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (\text{II-1})$$

Avec $S_{éolienne}$ la surface balayée par l'éolienne, ρ la masse volumique de l'air ($1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$) et v la vitesse du vent [1].

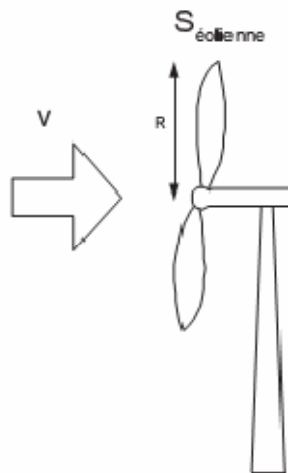


Figure II-1 : Eolienne simplifiée

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}).

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{\text{éolienne}}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p P_{\text{vent}} \quad (\text{II-2})$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 16/27.

Le coefficient C_p , diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (\text{II-3})$$

Avec R le rayon des pales de l'éolienne, Ω la vitesse de rotation de l'éolienne et v la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques.

Le coefficient de puissance est souvent modélisé par l'expression analytique suivante [1] :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_t} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (\text{II-4})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (\text{II-5})$$

$$C_1 = 0.5$$

$$C_2 = 116$$

$$C_3 = 0.4$$

$$C_4 = 5$$

$$C_5 = -21$$

$$C_6 = 0.0068$$

Avec β exprimé en degrés.

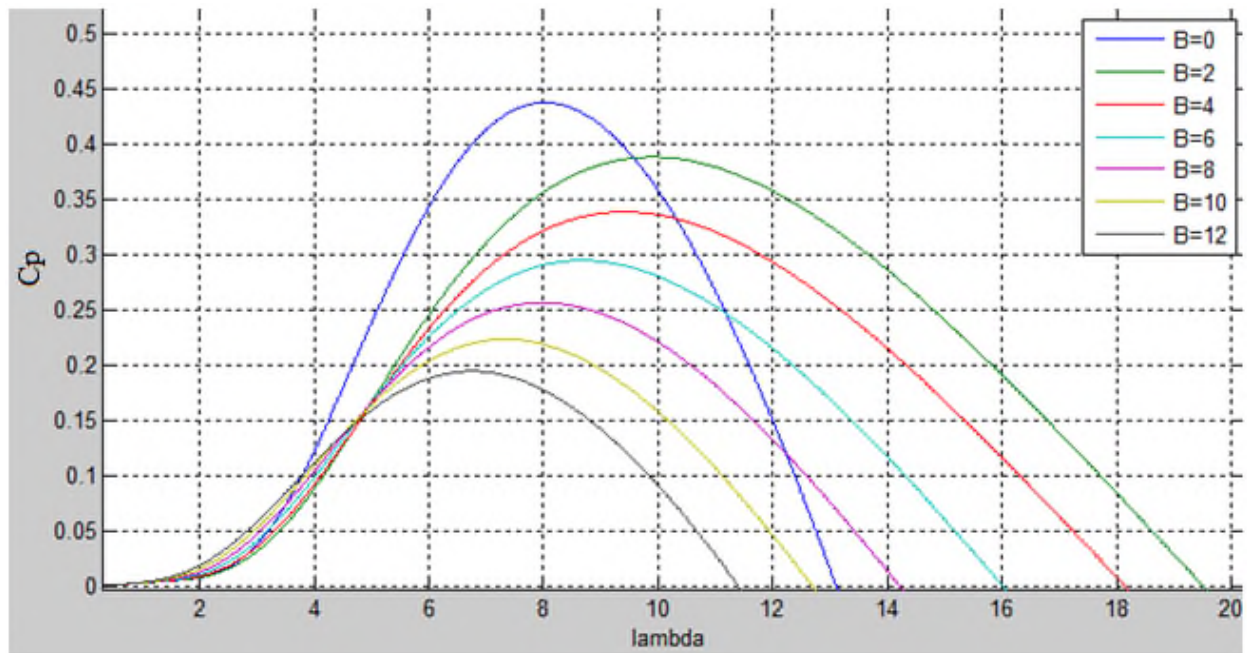


Figure II-2 : Coefficient de puissance C_p

La figure II-2 représente le coefficient de puissance C_p (calculé à partir de l'équation $C_p(\lambda_i, \beta_i)$) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal

à $\lambda_{optimal}$ à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure II.2 montre le $\lambda_{optimal}$ correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i .

Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{optimal}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur avec les variations de vitesse du vent (équation II.3).

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (Généralement la vitesse nominale de fonctionnement).

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% [11].

Au vu de la caractéristique suivante (Figure II-3), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

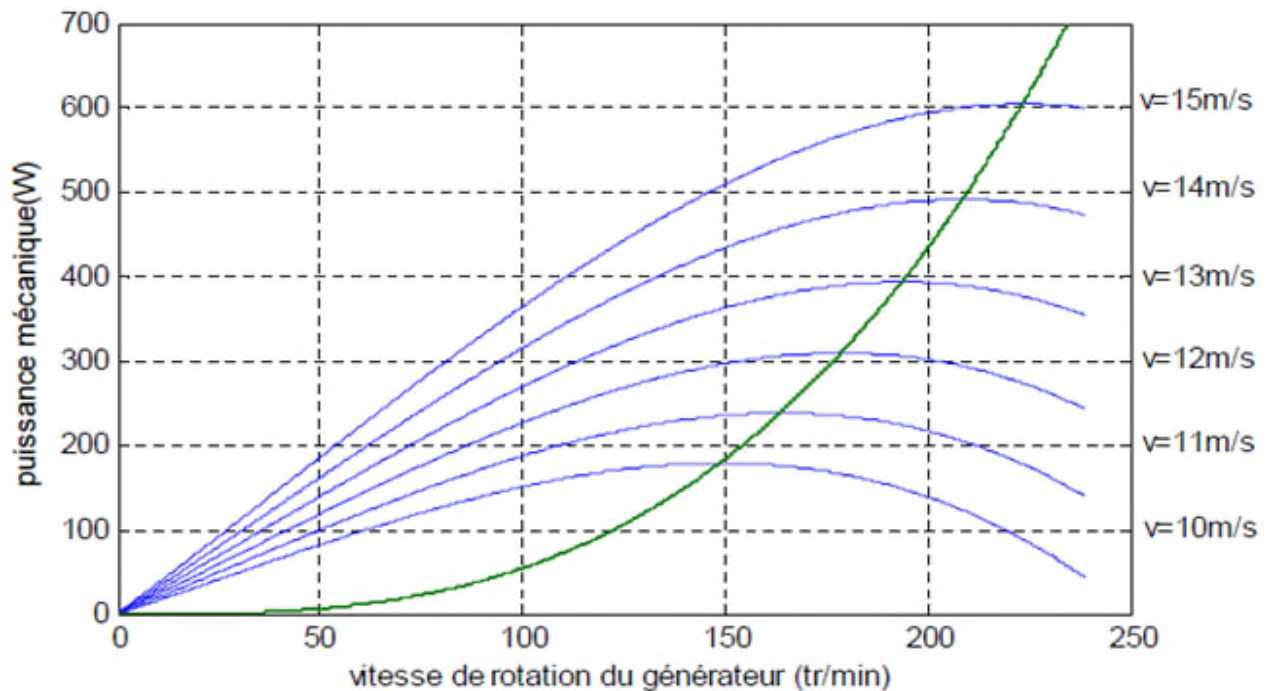


Figure II-3 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

II.2.2 Model de multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse en fonction de de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

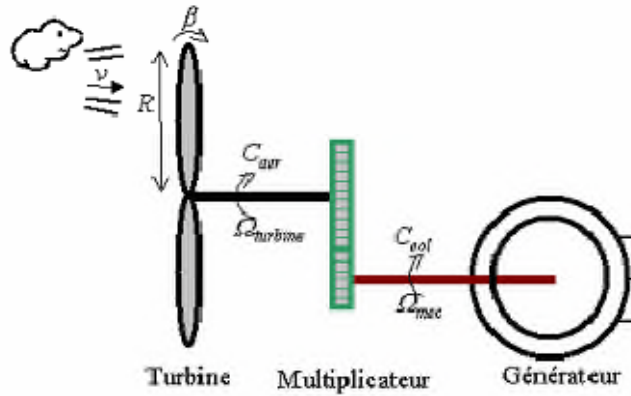


Figure II-4 : Schéma de la turbine éolienne [11].

Avec :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \text{(II.6)}$$

$$G = \frac{\Omega_{méc}}{\Omega_t} \text{(II.7)}$$

C_{aer} : Couple aérodynamique

$C_g = C_{aer}$: Le couple issu du multiplicateur

$\Omega_{méc}$: La vitesse mécanique transmise à la sortie du multiplicateur à la génératrice

Ω_t : la vitesse de la turbine

II.2.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission

Le modèle mécanique proposé est de considérer l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_{mach} \text{(II.8)}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale ($C_{méc}$) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \text{(II.9)}$$

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres, et du multiplicateur.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f \text{(II.10)}$$

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : le couple résistant du aux frottements.

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.11)$$

Avec :

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique

II.3 Méthode de recherche du point maximum de puissance :

Nous allons présenter dans ce point, deux stratégies de commande de la turbine éolienne en zone 2 (zone d'extraction de la puissance maximale): commande directe de la vitesse ou commande avec asservissement de vitesse où on contrôle la vitesse mécanique par un régulateur PI et commande indirecte de la vitesse mécanique ou commande sans asservissement de vitesse où le couple électromagnétique est contrôlé de façon à poursuivre la courbe du rendement maximal. Le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherché de la vitesse de rotation optimale [5].

Le schéma de la figure suivante illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine.

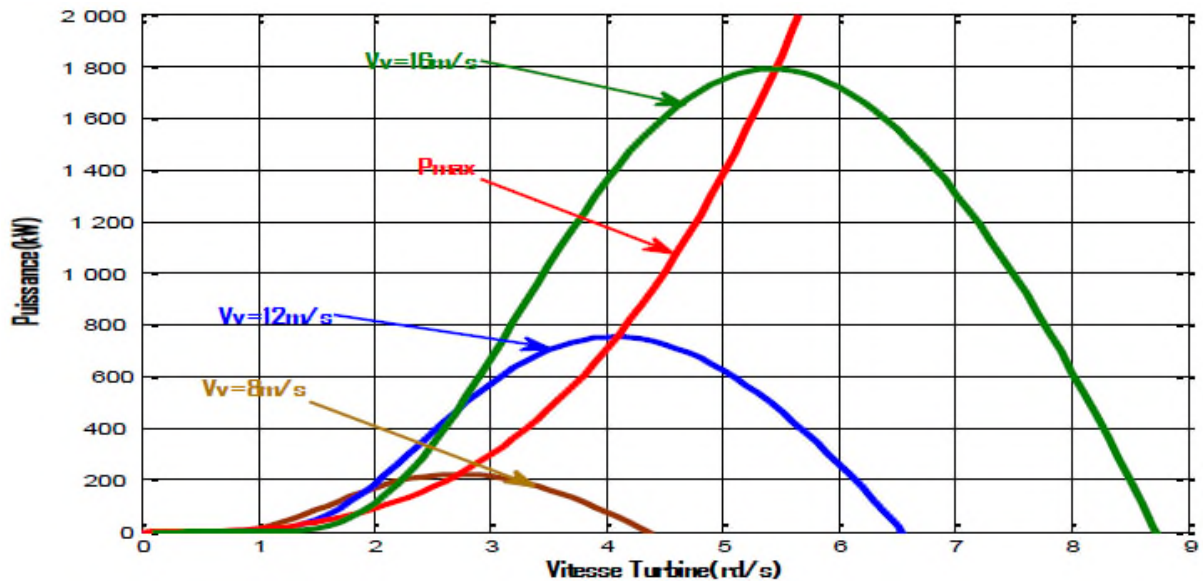


Figure. II.5 Caractéristique de l'éolienne par à port à la vitesse du vent

Chaque courbe correspond à une vitesse de vent V_v donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (II.12)$$

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but une commande spécifique connue sous la terminologie : **Maximum Power**

Point Tracking (MPPT) correspond à la zone II doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

On distingue deux approches possibles:

1. La première approche, la moins classique, considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue.
2. La deuxième approche, plus répandue, suppose que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

II.3.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

La méthode de maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse (ou commande indirect de vitesse). Elle est illustrée sur la figure (II.7). Elle est déduite d'expression des équations aérodynamiques et mécaniques de l'éolienne sur le point de fonctionnement lié à un C_p maximum.

Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs.

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent est presque constante, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varient très peu en régime permanent. Ceux-ci , nous conduit a déduire :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul $C_{mec} = 0$.
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé $C_f \approx 0$.

Lorsque l'éolienne fonctionne sur le point de fonctionnement optimal, alors :

$$\lambda_{opt} = \frac{R \Omega_{tur}}{v}, C_p = C_{p-max} \quad (II.13)$$

Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statique :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} = 0 \quad (II.14)$$

L'équation (II.14) donne :

$$C_{em} = C_g = C_{aér} \quad (II.15)$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = C_{aér-est} \quad (II.16)$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot s \cdot \frac{1}{\Omega_{tur-est}} V_{estimé}^3 \quad (II.17)$$

$\Omega_{tur-est}$: est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique .

$$\Omega_{tur-est} = \Omega_{mec} \text{ (II.18)}$$

$V_{estimé}$: est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donnée par l'expression :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{tur-est} \cdot R}{\lambda} \text{ (II.19)}$$

En utilisant les formules du (II.33) au (II.35), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence .

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2 \text{ (II.20)}$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur λ sa valeur optimale λ_{opt} correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p-max} . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2 \text{ (II.21)}$$

Le schéma bloc du modèle de la turbine est représenté comme suit :

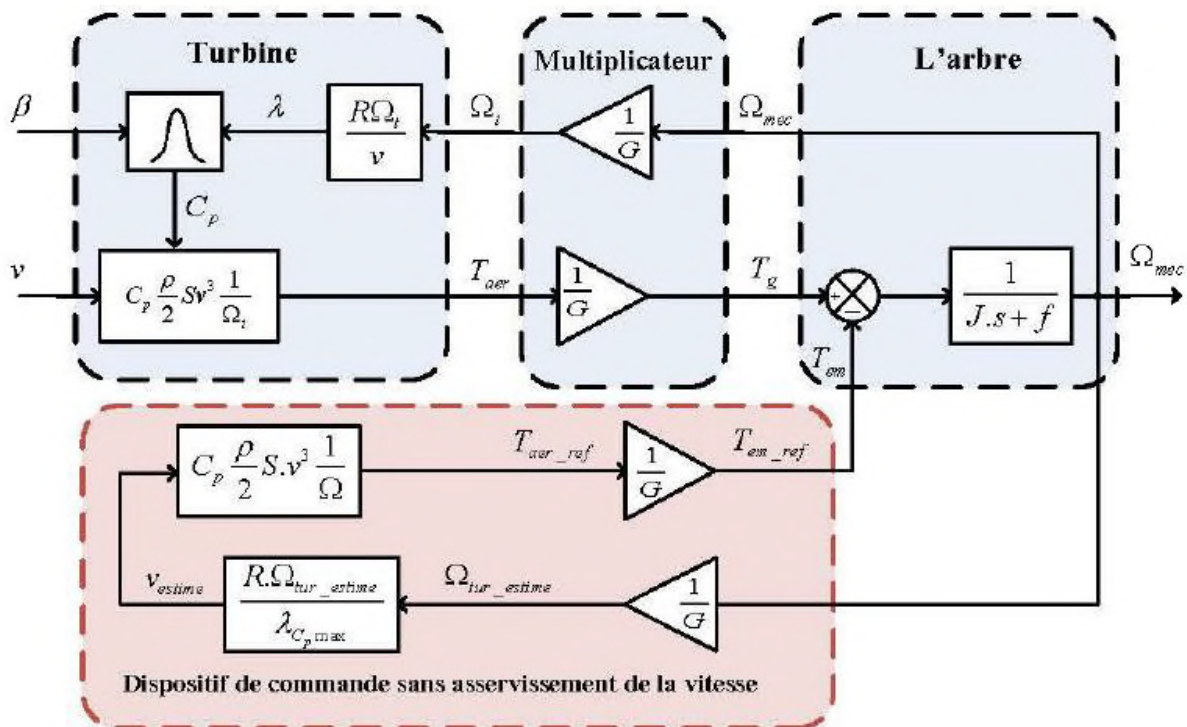


Figure. II.6 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans Asservissement de la vitesse.

II.3.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Cette stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, nous allons utiliser un asservissement de vitesse.

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Un régulateur PI suffit pour répondre à ce cahier des charges.

Cette commande nécessite l'utilisation d'un régulateur de vitesse. Nous avons procédé à la simulation de la turbine en utilisant les équations données précédemment.

Les conditions de simulation sont les suivantes :

1. $C_{p-max} = 0,46$: c'est le coefficient de puissance maximum.
2. $\lambda = 8,22$: c'est la vitesse relative maximale.
3. Le schéma de simulation doit permettre de commander la vitesse de rotation de sorte à maintenir les valeurs maximales de $C_{pe} \lambda$ quel que soit la vitesse du vent. Pour cela nous allons utiliser un contrôleur de vitesse (régulateur PI) [8].

Finalement on obtient le schéma bloc de la commande de la vitesse mécanique présenté sur la figure (II.23)

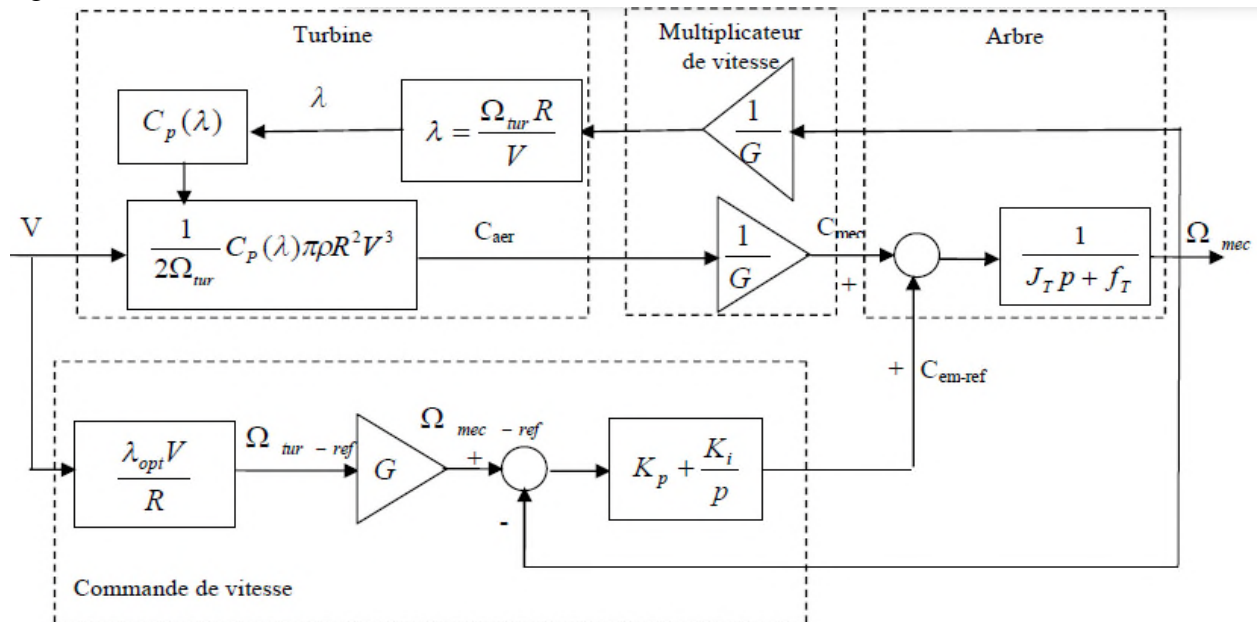


Figure. II.7 schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse.

II.3.2.1 Régulateur PI

Effet du correcteur :

- Augmentation de la marge de phase (comme l'indique le nom du correcteur).
- Augmentation de la bande passante (augmentation de la rapidité c-à-d diminution de temps de réaction).
- Erreurs en régime permanent imposées.
- Augmentation de la marge de stabilité -----> effet dérivateur.

II.3.3 Calcul du correcteur de la vitesse de la turbine

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donné par :

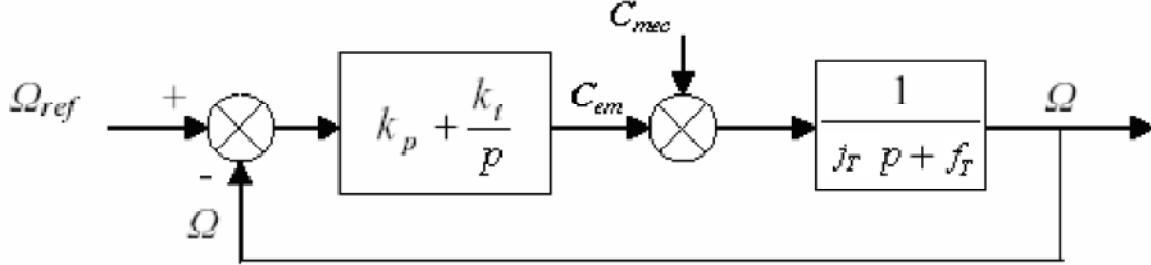


Figure. II.8 Régulation de la vitesse.

Le couple électromagnétique de référence est obtenu grâce à l'action d'un contrôleur de type PI sur la différence entre la vitesse de référence et la vitesse de rotation. La fonction de transfert qui décrit cette action est donnée par :

$$C_{em-ref} = (P)(\Omega_{tur-ref}(P) - \Omega_{mec}(P)) \quad (\text{II.31})$$

$$C_{em-ref} = (Kp + \frac{ki}{p})(\Omega_{tur-ref}(P) - \Omega_{mec}(P)) \quad (\text{II.32})$$

Kp : Le gain proportionnel.

Ki : Le gain intégral.

Comme le système à étudié est linéaire on peut écrire, en vertu du théorème de superposition, la fonction de transfert sous la forme suivante :

$$\Omega_{mec}(p) = F(p) \cdot \Omega_{ref}(p) - P(p) \cdot (p) \quad (\text{II.33})$$

$$(p) = \frac{kp \cdot P + Ki}{j p^2 + (f + Kp)P + Ki} \quad (\text{II.34})$$

$$(p) = \frac{P}{j \cdot p^2 + (f + Kp)P + Ki} \quad (\text{II.35})$$

On suppose que la perturbation est nulle : $C_{mec} = 0$

La fonction de transfert s'écrira alors comme ceci : $(p) = (p) \cdot (p) \quad (\text{II.36})$

La fonction de transfert possède une dynamique de 2^{ème} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_o^2} P^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_o}\right) P + 1 \quad (\text{II.37})$$

Alors:

$$\frac{Jt}{Ki} = \frac{1}{\omega_o^2} \quad (\text{II.38})$$

$$\frac{f + Kp}{Ki} = \frac{2\xi}{\omega_o} \quad (\text{II.39})$$

Alors:

$$Ki = Jt \cdot \omega_o^2 \quad (\text{II.40})$$

$$Kp = \frac{2 \cdot \xi \cdot Ki}{\omega_o} - ft \quad (\text{II.41})$$

ξ : Coefficient d'amortissement.

Pour obtenir la réponse optimale on choisit le coefficient d'amortissement $\xi=0.7$. Le temps de réponse à 5% est donné par: $t_r = \frac{3}{\xi\omega_0}$ (II.42)

On prend le temps de réponse 1/2 de τ_m pour assurer la rapidité du correcteur avec :

$$\tau_m = \frac{Jt}{ft} \text{ (II.43)}$$

τ_m : Constante de temps du système à régler.

Alors :

$$\omega_0 = \frac{3}{\xi(\tau_m/2)} \text{ (II.44)}$$

Enfin on peut déduire les valeurs de K_i et K_p .

$$K_i = 50$$

$$K_p = 10000$$

II.4 Résultats de simulation

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de simulation de la turbine par l'utilisation de la méthode MPPT avec et sans asservissement :

II.4.1 MPPT sans asservissement :

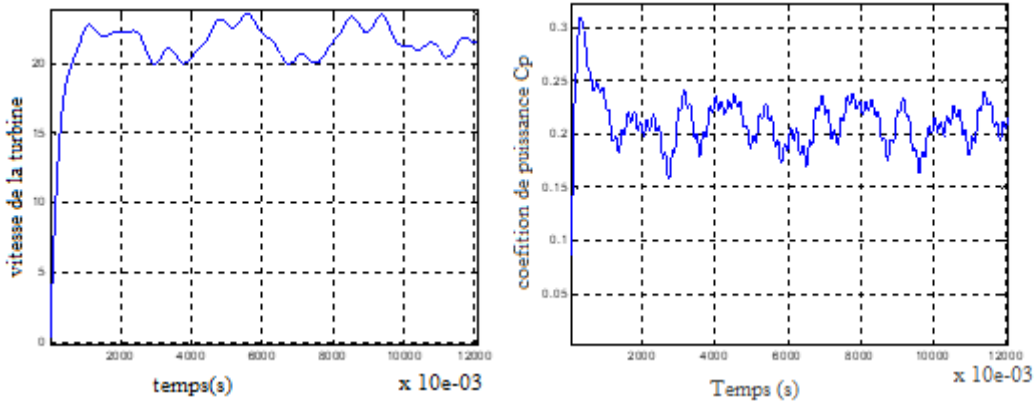


Figure II.9 : La vitesse de la turbine Figure II.10 : Le Coefficient de puissance (Cp)

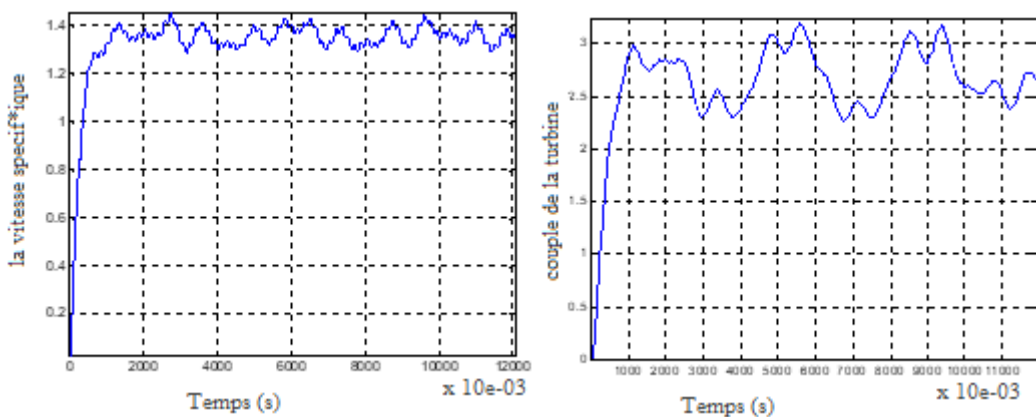


Figure II.11 : La vitesse spécifique (λ).

Figure II.12 : Le couple de la turbine.

Interprétation :

Pour un profil de vent égale à 9m/s appliqué sur les pales de la turbine on remarque que la vitesse de la turbine suit approximativement la variation de vitesse du vent, le rapport Ratio de la vitesse (λ) varie légèrement autour de 1.42.

La valeur de coefficient de puissance (C_p) reste inférieure à la valeur de C_{pmax} .

II.4.2MPPT avec asservissement :

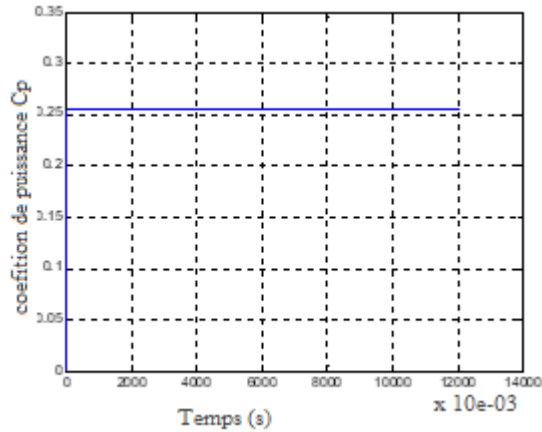
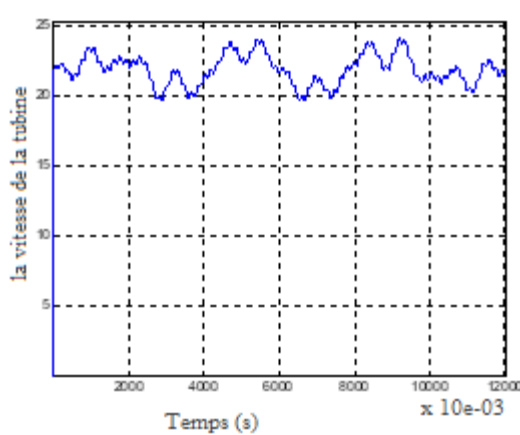


Figure II.13 : La vitesse de la turbine. Figure II.14 : Le Coefficient de puissance (C_p)

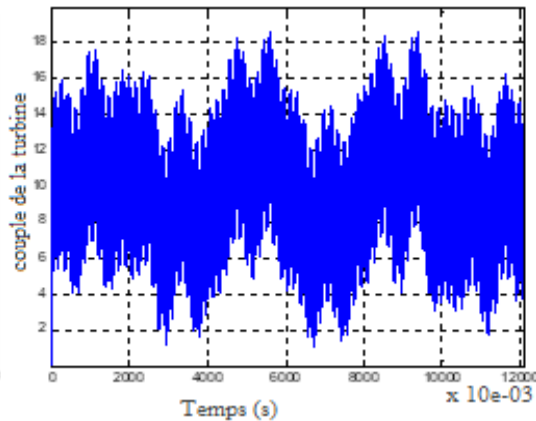
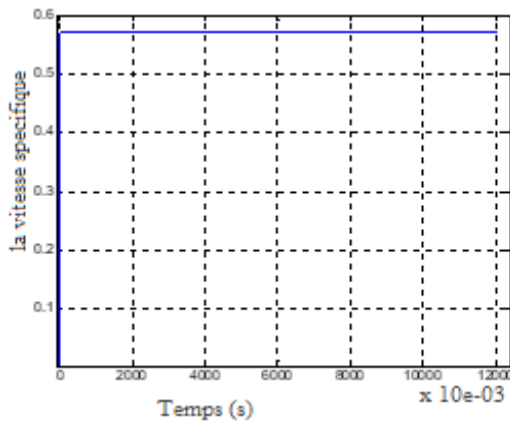


Figure II.15 : La vitesse spécifique (λ).

Figure II.16 : Le couple de la turbine.

Interprétation :

Pour une vitesse de vent égale à 9m/s appliquée sur les pales de la turbine on remarque que la vitesse de la turbine suit approximativement la variation de la vitesse du vent, le rapport Ratio de la vitesse (λ) est stable à 0.6.

La valeur de coefficient de puissance (C_p) reste inférieure à la valeur de C_{pmax}

On peut observer une meilleur stabilité de la vitesse par a port à MPTT sans asservissement

II.5Type de machine électrique

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [12] :

Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple.
- Plus grande habilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

Fonctionnement à vitesse variable

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [12]. On s'intéresse dans ce chapitre par la machine synchrone à aimant permanent.

II.5.1 Modélisation de la machine synchrone a aimant permanent

La machine synchrone a aimant permanent est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée a une turbine éolienne et surtout pour les applications isolées et autonomes qui est notre cas. Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine l'établissement de son modèle mathématique sera développer sur la base des hypothèses simplificatrices. [13]

II.5.2 Les hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique
- La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau
- L'effet d'encochage est négligeable
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température

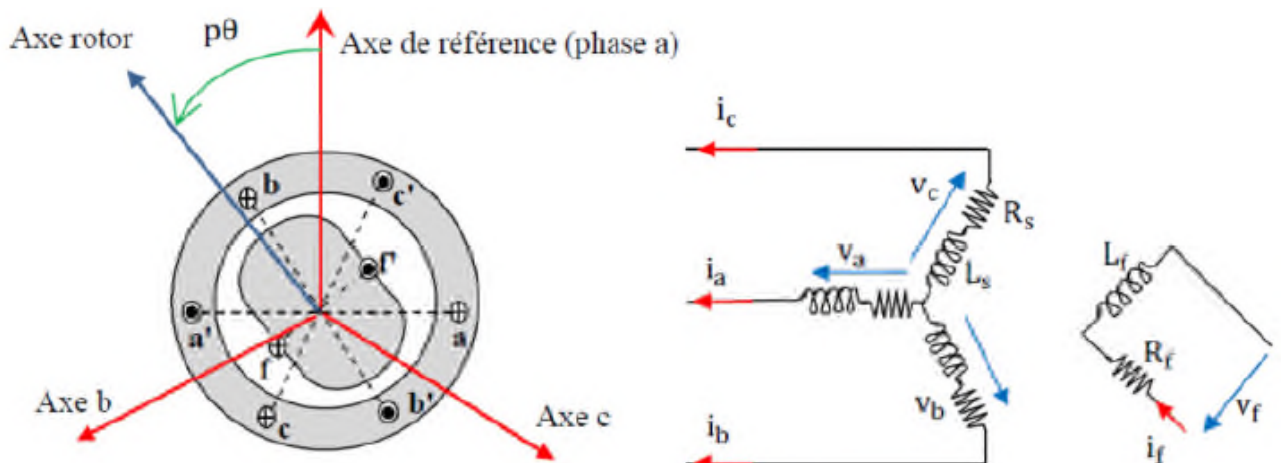


Figure II.17 :Représentation symbolique de la MSAP

II.5.3 Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est constituée par trois bobinages statoriques qui constituent les trois phases, et des aimants au rotor distribués en 17 paires de pôles. Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer [14].

II.5.4 Equations électriques et magnétiques de la machine

La machine synchrone à aimants permanents est constituée par trois bobinages statoriques qui constituent les trois phases, et des aimants au rotor distribués en 17 paires de pôles. Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer.

- ❖ Au stator : trois enroulements a, b, c décalés entre eux de $2\pi/3$ électriques.
- ❖ Au rotor : un inducteur à aimants permanents.

La figure 16 montre la représentation de la MSAP dans le repère triphasé.

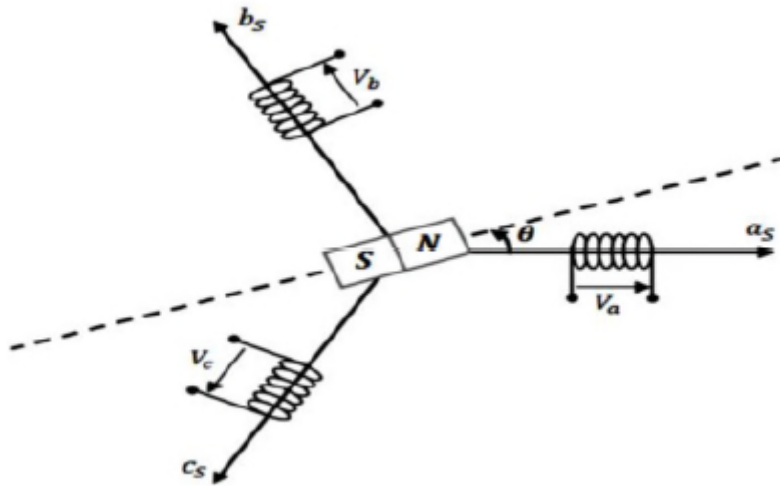


Figure II.18 : Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)

Les équations électriques des machines électriques dans le repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Avec :

R_s : La résistance des phases statoriques.

$[V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^t$: Les tensions des phases statoriques.

$[I_{sa} \quad I_{sb} \quad I_{sc}]^t$: Les courants des phases statoriques

$[\varphi_{sa} \quad \varphi_{sb} \quad \varphi_{sc}]^t$: Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de Park de cette machine (figure II.4) est sera utiliser V_{sd} , V_{sq} et I_{sd} , I_{sq} . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage.

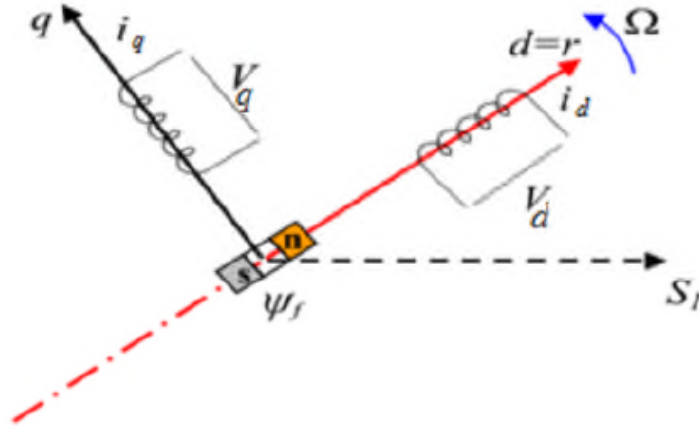


Figure II.19: Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)][V_{sabc}]$$

$$[I_{sdq}] = [P(\theta)][I_{sabc}]$$

Avec :

$P(\theta)$ Matrice de PARK est donnée par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan abc on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta s) & -\sin(\theta s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - P \Omega \varphi_{sd} \quad (\text{II.31})$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{dq} + P\Omega \varphi_{sq} \quad (\text{II.31})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, φ_{sd} et φ_{sq} sont fonctions linéaires des courants I_{sd} et I_{sq} :

$$\begin{aligned} \varphi_{sd} &= L_{sd} I_{sd} + \varphi_e \\ \varphi_{sq} &= L_{sq} I_{sd} \end{aligned}$$

Où : φ_e représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.
Les équations de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - L_s P\Omega I_{sq} \\ V_{sq} &= R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + L_s P\Omega I_{sd} + \varphi_e P\Omega \\ \omega &= P\Omega \end{aligned}$$

Avec :

$I_{sd} I_{sq}$: Courants statoriques dans le repère de Park [A].

$V_{sd} V_{sq}$: Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

R_s : Résistance statoriques [Ω].

L_s : Inductance cyclique statoriques [H].

p : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.

ω : Pulsation des tensions [rad/s].

Les tensions étant les grandeurs d'entrées, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

$$\frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_{sq} - R_s I_{sq} - L_{sq} P\Omega I_{sd} - \varphi_e P\Omega)$$

En les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{pmatrix} = \frac{1}{L_s} \left[\begin{pmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & -L_s P\Omega \\ L_s P\Omega & R_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_e P\Omega \end{pmatrix} \right]$$

Pour compléter le modèle électromécanique de la MSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique [15].

L'expression du couple électromagnétique est exprimée par :

$$T_{em} = \frac{3}{2} P [\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}]$$

$$T_{em} = \frac{3}{2}P[(L_{sd} - L_{sq})I_{sd}I_{sq} - \varphi_e I_{sq}]$$

Avec :

$$L_{sd} = L_{sq} = L_s$$

Le couple électromagnétique sera :

$$T_{em} = \frac{3}{2}P\varphi_e I_{sq}$$

II.5.5 Circuit équivalent de la MSAP

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés à partir des équations (II.21) et (II.22) comme suit :

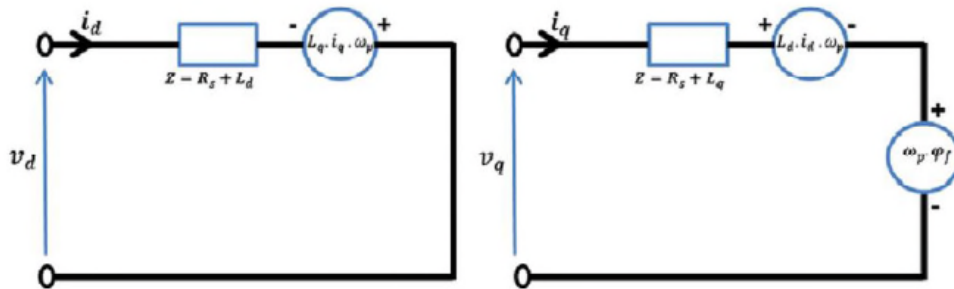


Figure II.20 : circuit équivalent de MSAP.

En utilisant la convention génératrice ; on inverse le sens des courants i_d et i_q dans les repères de Park, et le modèle de la génératrice synchrone à aimant permanent ainsi obtenu, peut s'écrire sous la forme [16] :

$$V_{sd} = -R_s I_{sd} - L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + L_s P \Omega I_{sq}$$

$$V_{sq} = -R_s I_{sq} - \frac{dI_{sq}}{dt} - L_s P \Omega I_{sd} + \varphi_e P \Omega$$

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit :

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = T_{em} - T_m - f_m \Omega_m$$

II.5.6 Le ponts de redressement triphasé

La figure suivante donne le schéma électrique des montages P3 et PD3. Ces deux montages sont les plus communément utilisés pour le redressement de tensions triphasées.

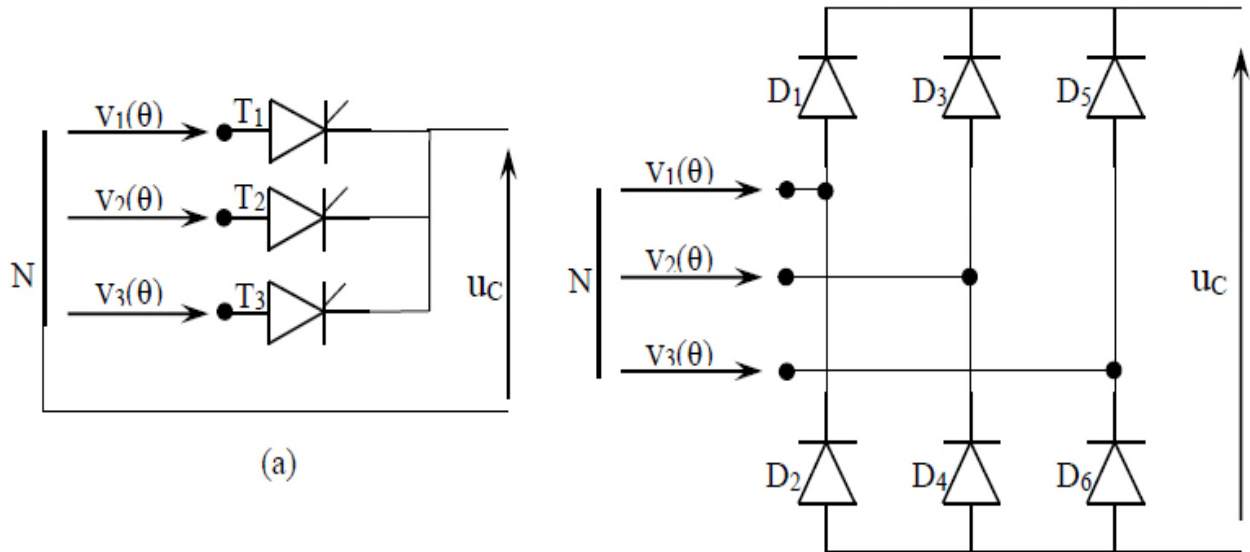


Figure II-21 : Redresseurs triphasés. (a) P3. (b) PD3

II.6 Simulation de la chaîne globale de conversion

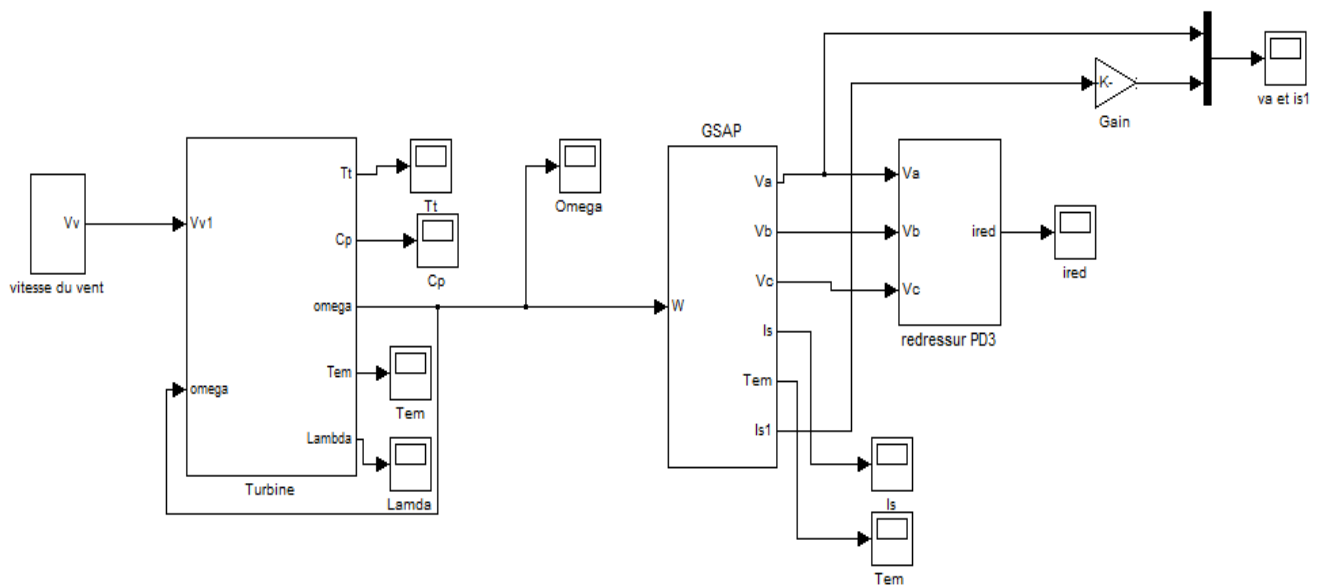


Figure II-22 Structure globale de la chaîne de conversion.

II.6.1 Turbine

La turbine est entraînée par une MSAP, dont le schéma bloc correspondant est représenté dans la figure II-23.

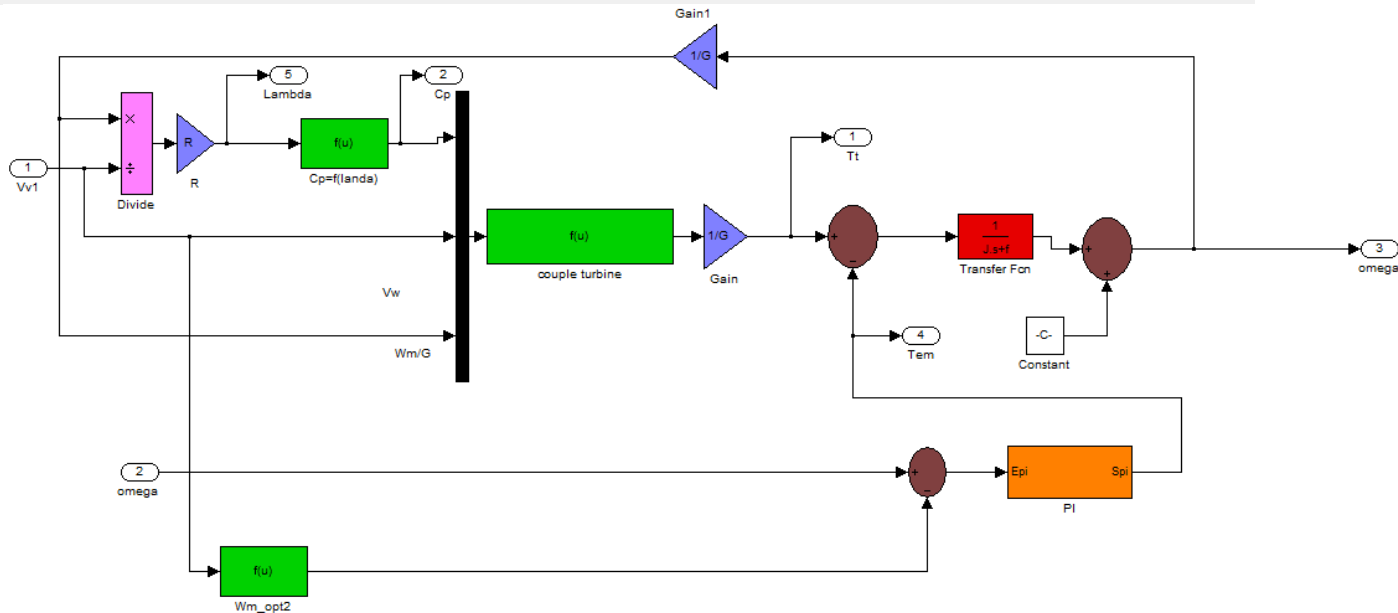


Figure II-23 Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne (Matlab – Simulink).

II.6.2 Machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimant permanent est utilisée dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. On utilise une MSAP pour convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de 3.82 KW. Son schéma bloc est représenté dans la figure II-24.

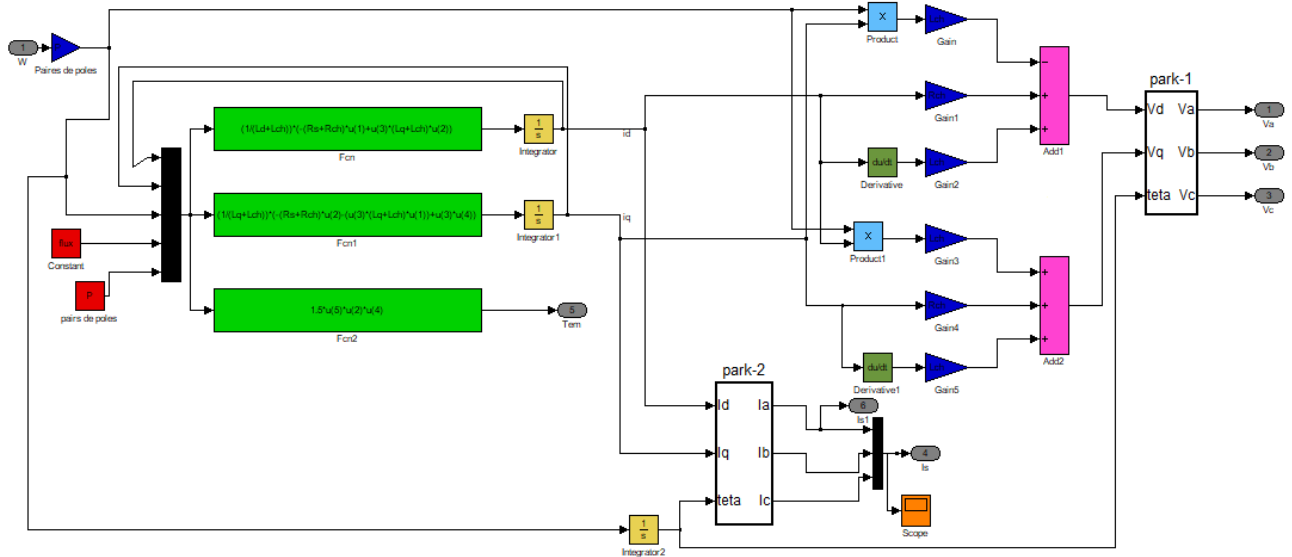


Figure II 24 : Machine synchrone à aimant permanent.

II.6.3 Le ponts de redressement triphasé

La figure suivante représente schéma bloc d'un redressement de tensions triphasées diode en utilisant des opérateurs relationnels.

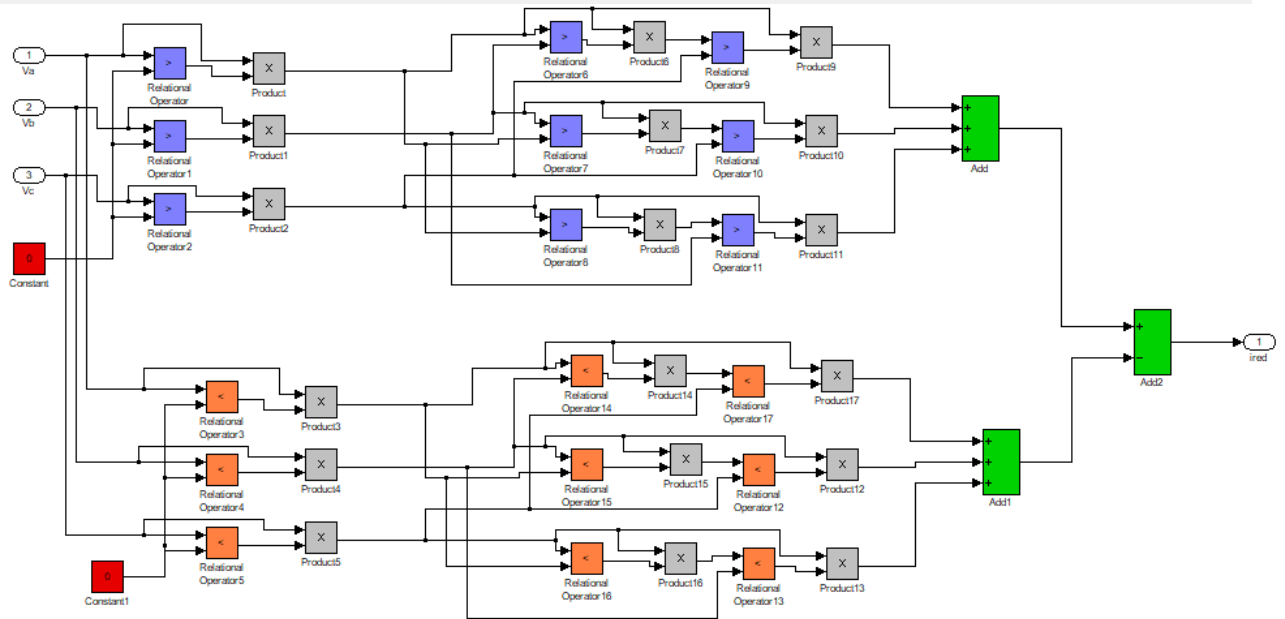


Figure II-25 Le schéma redresseur a diode

II.6.4 Résultats de simulation

Dans cette partie, quelques résultats de simulation d'une éolienne reposant sur la machine synchrone à aimant permanent obtenus sous Matlab/Simulink sont présentés, (à partir des paramètres fournis en annexe).

II.6.5 Vitesse du vent

Nous avons exposé notre éolienne à un vent variant entre 3 m.s^{-1} et 2.5 m.s^{-1} pour fournir l'énergie mécanique nécessaire à la fonction de la MSAP (figure II-26).

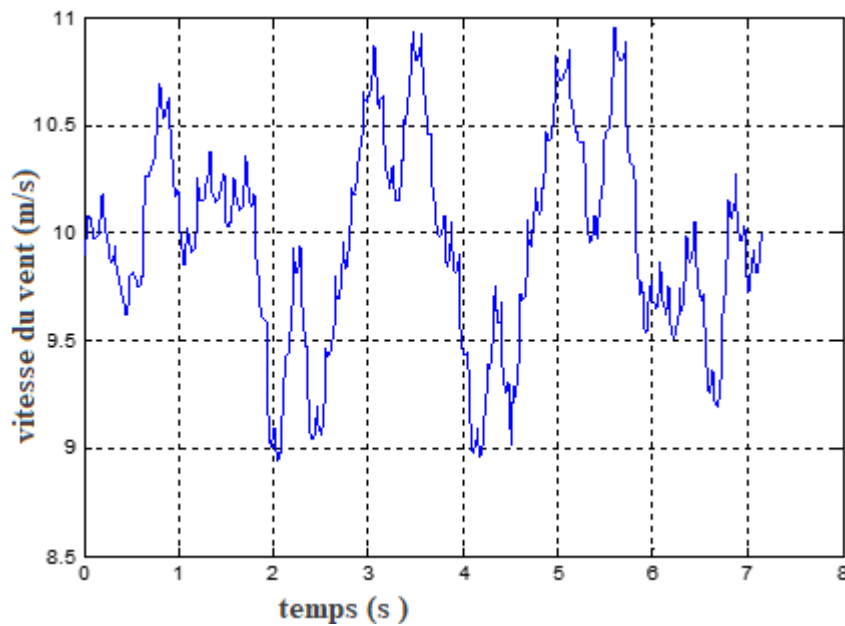


Figure II-26 : Vitesse du vent Vv

Dans la figure 27 nous avons connecté notre MSAP à une turbine à vitesse mécanique variable, fluctuant entre 25 et 20 rad/s

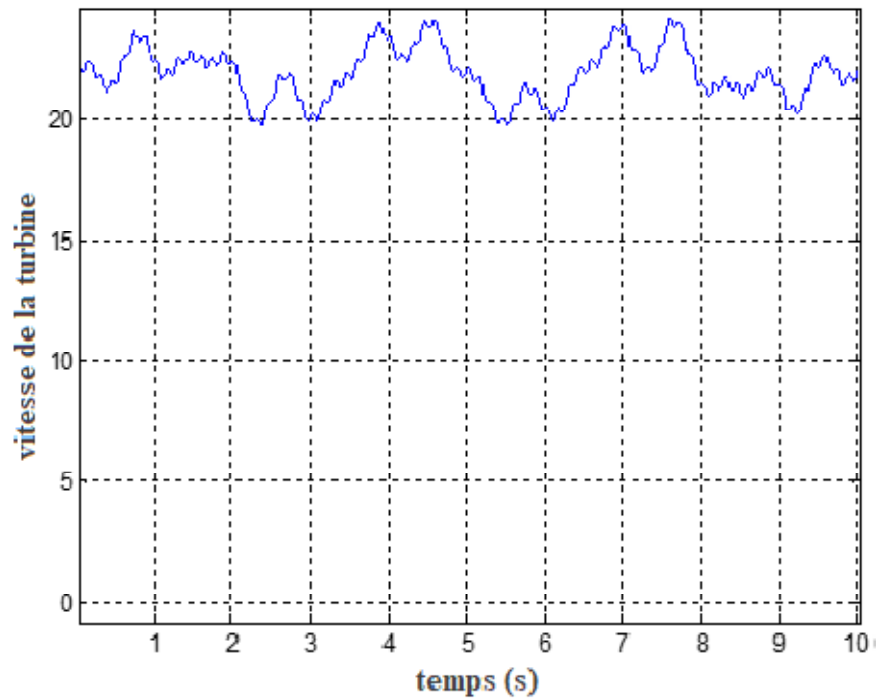


Figure II-27 : vitesse de la turbine

Dans la figure II-28 on illustre l'allure de la tension résultant de la génératrice. C'est une tension de la forme sinusoïdale d'amplitude 24 V .

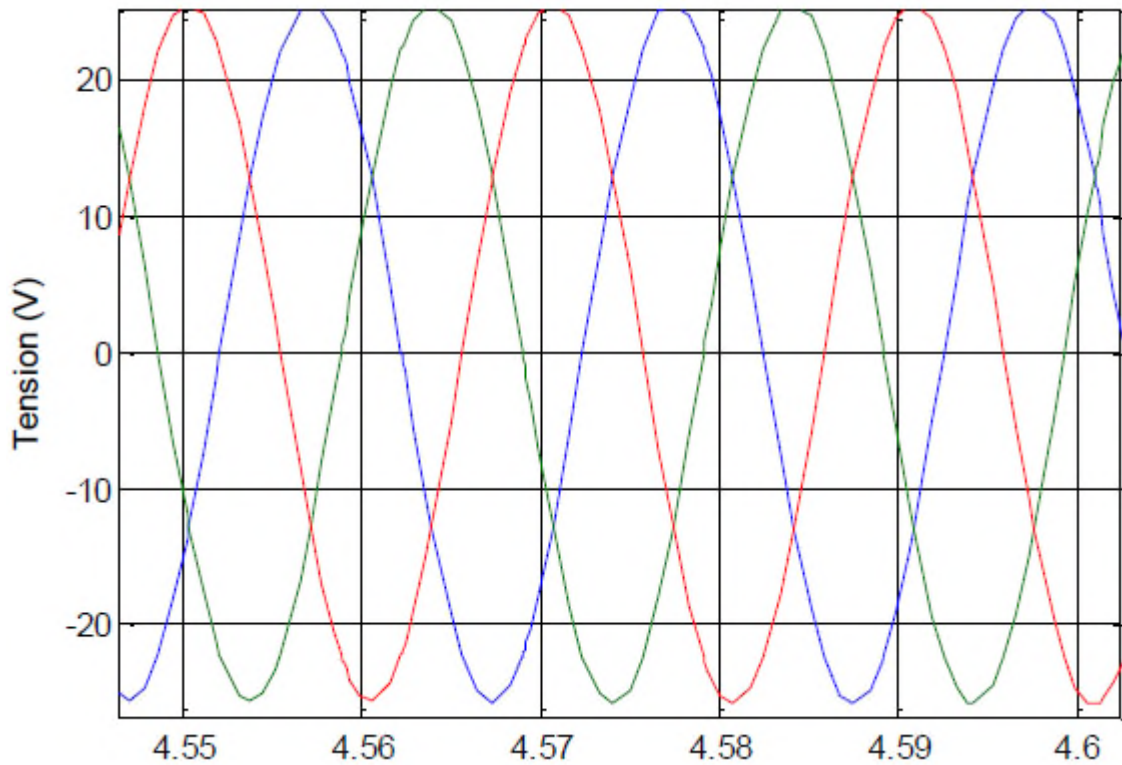


Figure II-28 : Tension composée de la génératrice.

Dans la figure II.29 on illustre l'allure de la tension redresser résultant de la sortie du redresseur. C'est une tension de la forme semis continu avec des variations de l'ordre de 5 vautour de 40 V.

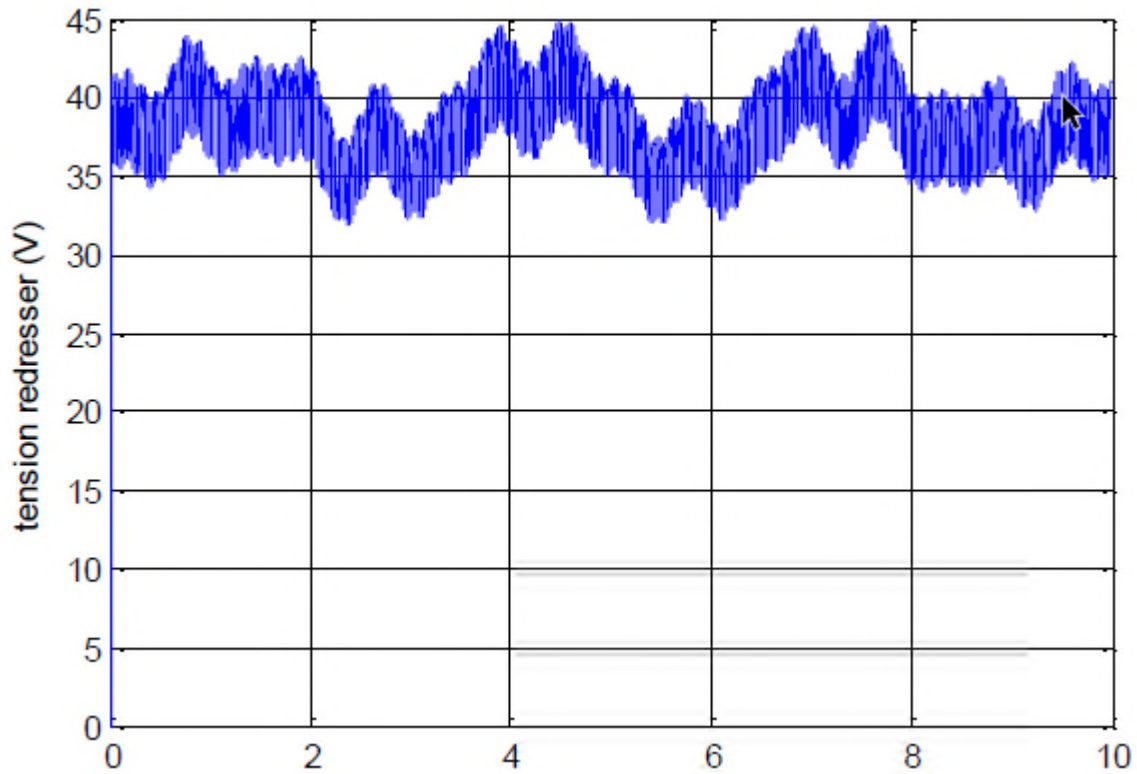


Figure II-29 Tension redresseur

II.7 CONCLUSION

L'essentiel de notre contribution est abordé dans le présent chapitre, à savoir la simulation de la conversion de l'énergie. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité.

Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion et pu observer son comportement dans des conditions optimales et pour ensuite pouvoir le comparer à la pratique dans le prochain chapitre.

III.1. Introduction

Dans cette partie nous allons développer des procédures d'équilibrage statique et dynamique afin de garantir le même effort en rotation pour toutes les pales, puis nous allons procéder à l'identification de notre alternateur, ensuite nous allons effectuer une étude expérimentale de notre éolienne.

III.2 Caractéristique de l'éolienne à étudier

Pour des raisons de stabilité, la plupart des éoliennes modernes sont tripales, cette conception s'est imposée sur le marché mondial. Les systèmes éoliens captent l'énergie du vent en utilisant pales montées sur la tour.

Le vent fait tourner les pales et les pales font tourner un alternateur qui produit de l'électricité. par une girouette permet d'orienter l'éolienne l'identification des différents paramètres de l'éolienne est un pat pour pouvoir étudier son fonctionnement et son comportement en plaine aire.

III.2.1 Dimensionnement des pales

Les pales sont une partie très importante de l'aéromoteur. Le rendement dépend de la longueur des pales mai aussi le choix du model

Les choix de profils sont nombreux et répondent à des besoins particuliers. Dans notre cas Il s'agit du profil creux classique **NACA 6409**[17].

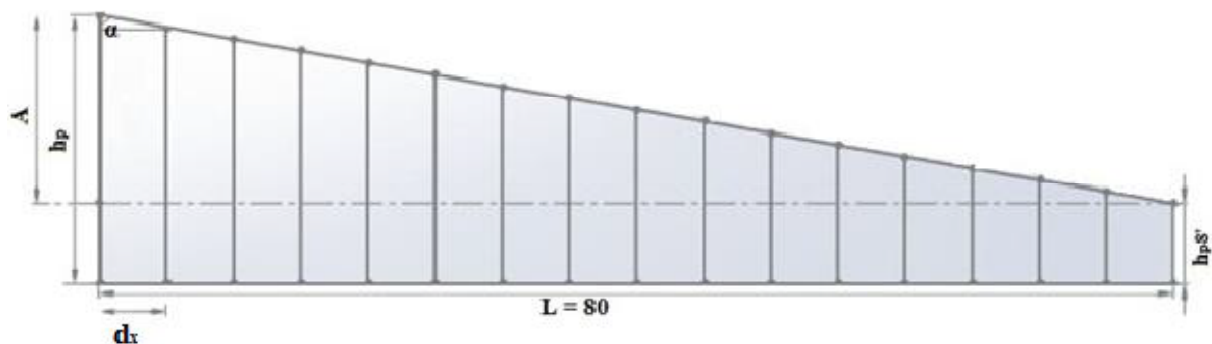


Figure III.1 Dimensions des pales

La longueur de la pale $L = 80$ cm

$dx = 5$ cm

La largeur du profil 1 (P1) : $P1 = 20$ cm

La largeur du profil 8' (P8') : $P8' = 6$ cm

III.2.2 Le Mat

Il s'agit d'un arbre plein de longueur $L = 120$ m et de diamètre $d = 65$ mm, un roulement de diamètre $d = 60$ mm, dans le but de l'interposer entre l'arbre et le moyeu [17].

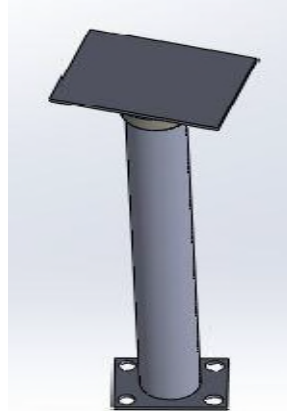


Figure III.2 Mat éolienne

III.2.3 Système poulie courroie

Dans un système de transmission poulie et courroie, le rapport de transmission entre la vitesse de la roue menant et la roue menée dépend directement de leur diamètre d .

Si l'alternateur tourne à une vitesse w_2 égale à 157 rads, en appliquant la relation ci-dessous pour calculer la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne w_1 :

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{d_1}{d_2} \quad \text{III.4}$$

$$w_1 = \frac{d_2}{d_1} w_2 = 46.16 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \text{III.4}$$

Avec :

d_1 : Diamètre de la poulie motrice ($d_1 = 163$ mm).

d_2 : Diamètre de la poulie réceptrice ($d_2 = 50$ mm).

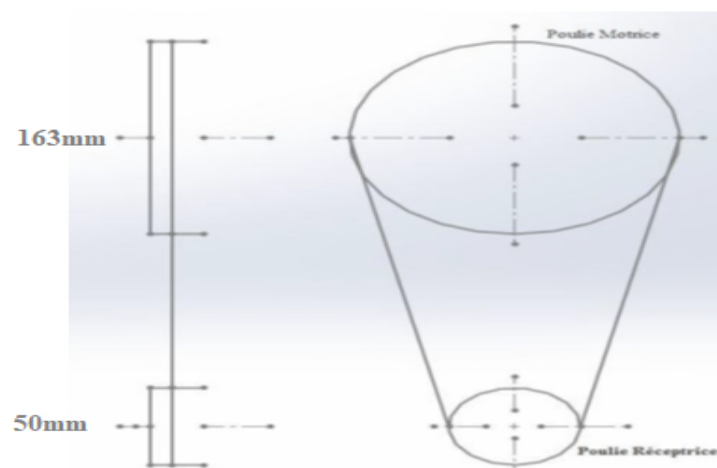


Figure III.3 Schéma cinématique

La vitesse linéaire de la courroie est :

$$V_1 = R \omega_1 = \frac{d_1}{2} \omega_1 = 3.92 \frac{m}{s}$$

Avec :

R : Le rayon de la poulie motrice (m).

Le rapport de transmission est : $r = \frac{D_1}{D_2}$ III.5

$$r = \frac{163}{5} = 3.26$$

Le résultat trouvé $r = 3.26$ est satisfait largement la valeur du rapport souhaité [17].

III.2.4 Alternateur

La production électrique est le fruit de la transformation de la puissance mécanique en une puissance électrique, pour ce faire un alternateur à griffes Volvo 20466316 a été étudié.

Caractéristique de L'alternateur à griffes « Volvo 20466316 » :

- ✓ Voltage [V]: 24
- ✓ Diamètre [mm]: 73
- ✓ Courant [A]: 90
- ✓ Nombre de rainures: 8
- ✓ Rotation: sens des aiguilles d'une montre (CW)



Figure III.4 Alternateur à griffes Volvo 20466316

IV.3 Equilibrage de l'éolienne

L'équilibrage est une opération qui consiste à contrôler et corriger la répartition des masses sur un mobile pour s'assurer que le balourd résiduel se situe dans les limites acceptables. Cette technique permet de stabiliser une pièce qui dispose d'un axe de rotation, En effet un mauvais équilibrage peut créer des vibrations supplémentaires. Cela va aussi provoquer des à-coups destructeurs. Il est donc nécessaire de réaliser un équilibrage le plus précis possible.

Il existe deux types d'équilibrage : l'équilibrage statique (en l'absence de rotation) et l'équilibrage dynamique (lorsque le mobile tourne sur son axe principal).

IV.3.1 Equilibrage statique

Cela consiste à rajouter des petites masses en bout de la pale afin que l'hélice puisse s'arrêter dans n'importe quelle position. Le fait que les masses de chaque pale soit égales ne change rien, car c'est la répartition de la matière qui équilibre l'ensemble [17]. Nous avons pesé les 3 pales éoliennes :

La première pale : 914 g

La deuxième pale : 860 g

La troisième pale : 902 g

D'après les résultats trouvés, nous avons ajouté de petites masses pour la deuxième (54 g) et la troisième pale (12 g) pour avoir la même masse que la première pale. Le poids de chaque pale égal à 914 g

Les masselottes on était fixé à l'arrière des palesMaintenons un équilibrage dynamique est demandé en régime permanent.

IV.3.2 Equilibrage dynamique

Pour l'équilibrage dynamique, On a exposé notre éolienne à une rafale de vent, on a pu constater une grand perturbation au niveau de l'équilibre de l'appareille, les masselottes ont pas suffi à éliminer toutes les vibrations, l'origine des balourd est peut être résulté des masselottes fixé à l'arrière des palme une vérification plus pousser est demandé En théorie il est conseillée de faire l'équilibrage dynamique du rotor, mais en pratique ce n'est pas évident [17].

III.4Caractérisation dynamique

Un aérogénérateur permet d'extraire l'énergie cinétique contenue dans le vent et de la convertir en énergie mécanique ou électrique. Les centrales éoliennes de production d'électricité sont en pleine expansion. La puissance théorique de l'énergie éolienne est définie par :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

ρ : La masse volumique de l'air au niveau de la mer ($1,25 \text{ kg/m}^3$ aux conditions $T=20^\circ\text{C}$ et $P=1\text{atm}$),

S: la section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor (m^2)

V: vitesse du vent (m/s)

On a présenté la puissance de vent en fonction de sa vitesse dans le tableau ci-dessus :

Tableau III-1 La puissance du vent en fonction de la vitesse.

vitesse (km/h)	Puissance (W/m^2)
0	0
5	157
7.6	551.4
8.7	827
11	1671
14	3447
16	5146
19	8615
23	152821

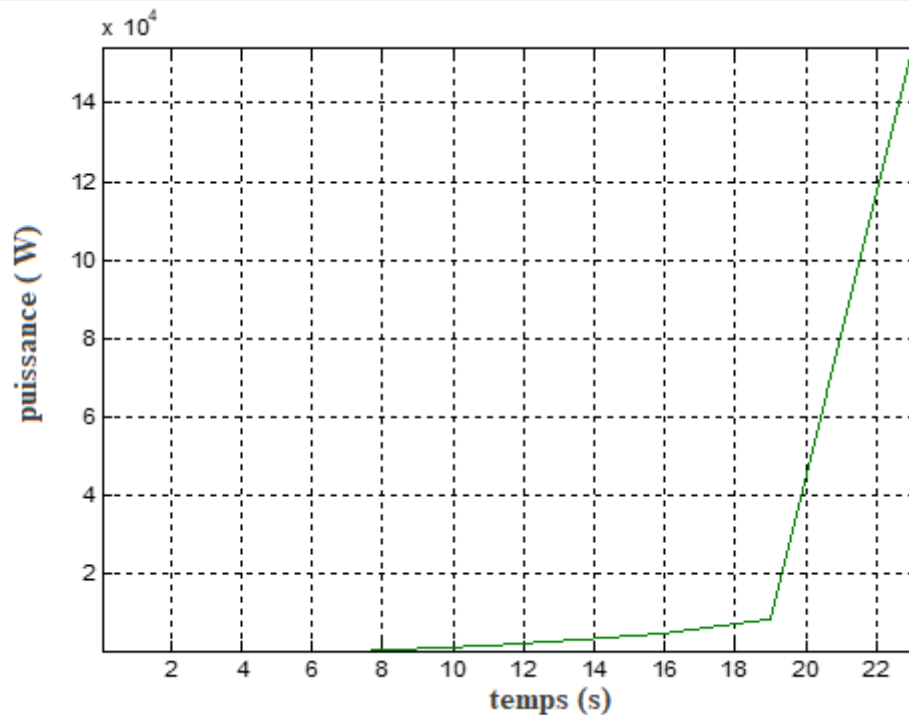


Figure III.5 La puissance en fonction de la vitesse du temps

D'après la courbe on remarque que la puissance du vent augmente de 0 à 152821 W/m² quand la vitesse augmente de 0 à 23 km/h.

Remarque

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}). La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne ($P_{éolienne}$) peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{éolienne} = C_p P_{vent}$$

III.4.1 Variation de la puissance $P_{éolienne}$ en fonction de l'angle d'inclinaison des pales

Pour chaque valeur de l'angle d'inclinaison β on aura un coefficient de puissance C_p différent

La valeur de C_p est déduite à partir de Figure II-2

Pour :

$$\beta=0 \text{ on a } C_p=0.43$$

$$\beta=2 \text{ on a } C_p=0.36$$

$$\beta=4 \text{ on a } C_p=0.32$$

$$\beta=6 \text{ on a } C_p=0.26$$

La puissance résultante à partir de l'angle d'inclinaison est mis dans le tableau suivant :

Tableau III-2: La puissance du vent en fonction de la vitesse et de l'angle d'inclinaisons.

vitesse (km/h)	$P_{\text{éolienne}}(W), b=0$	$P_{\text{éolienne}}(W), b=2$	$P_{\text{éolienne}}(W), b = 4$	$P_{\text{éolienne}}(W), b = 6$
0	0	0	0	0
5	67.51	56.52	50.24	40.82
7.6	237.1	198.5	176.5	143.4
8.7	355.6	297.8	265	215
11	718.5	602	535	435
14	1482	1241	1103	896
16	2213	1853	1647	1338
19	3705	3102	2757	2240
23	6570.3	5500	4890	3980

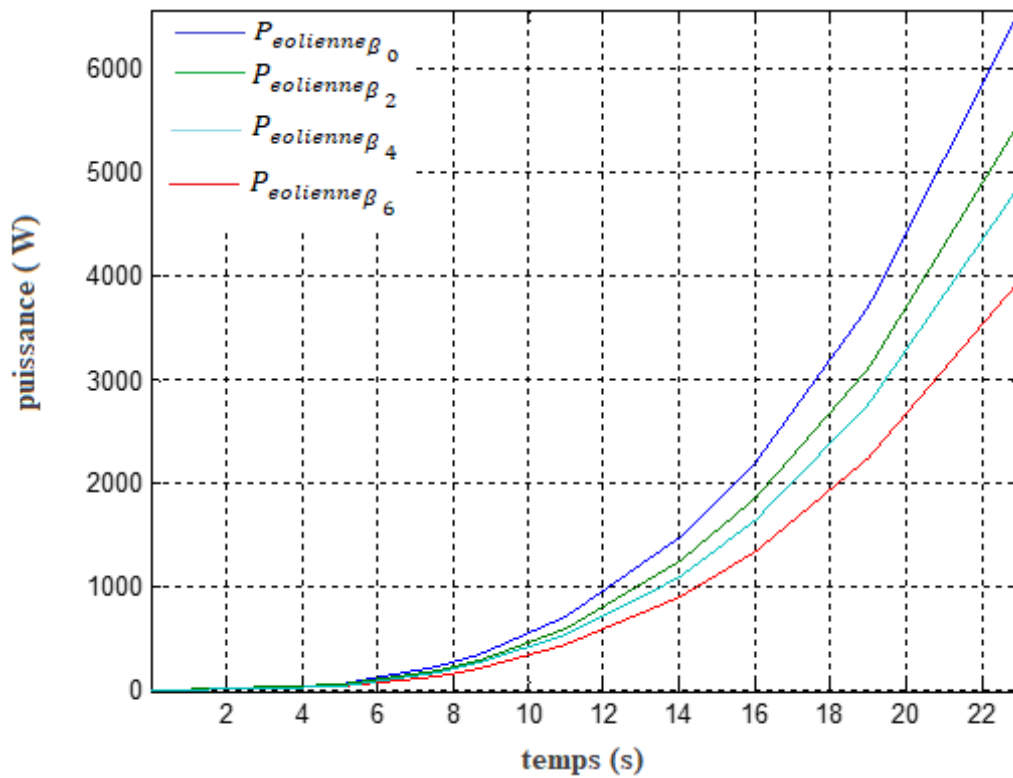


Figure III.6 Puissance théorique disponible pour notre d'éolienne

III.4.2 Tension, obtenue à partir du vent en fonction de La vitesse et de L'angled'inclinaison des pales :

Nous allons produire de l'électricité en transformant une puissance mécanique en une puissance électrique pour ce faire, l'alternateur dispose d'un axe qui entraîne en rotation la combinaison de rotor et stator entre lesquels l'alternance de champs magnétiques génère de l'électricité

Les essais ont été réalisés à une altitude de 600m là où on a des rafales de vent maximales, la vitesse de vent en cette journée est de 21km/h

III.4.3 Tension obtenue pour chaque angle d'inclinaison des pales

Pour cette partie, on a prélevé la valeur de la tension produite par l'éolienne pour chaque $t=6$

s. Les valeurs de la tension pour $\beta = 0$ sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.3 Relevé de tension à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 0$

$U_{t=0}(v)$	$U_{t=6}(v)$	$U_{t=12}(v)$	$U_{t=18}(v)$	$U_{t=24}(v)$	$U_{t=30}(v)$	$U_{t=36}(v)$	$U_{t=42}(v)$	$U_{t=48}(v)$	$U_{t=54}(v)$
12	14	10	16	15	18	17	23	19	8
$U_{t=60}(v)$	$U_{t=66}(v)$	$U_{t=72}(v)$	$U_{t=78}(v)$	$U_{t=84}(v)$	$U_{t=90}(v)$	$U_{t=96}(v)$	$U_{t=102}(v)$	$U_{t=108}(v)$	$U_{t=114}(v)$
9	10	11	16	14	8	6	10	7	6

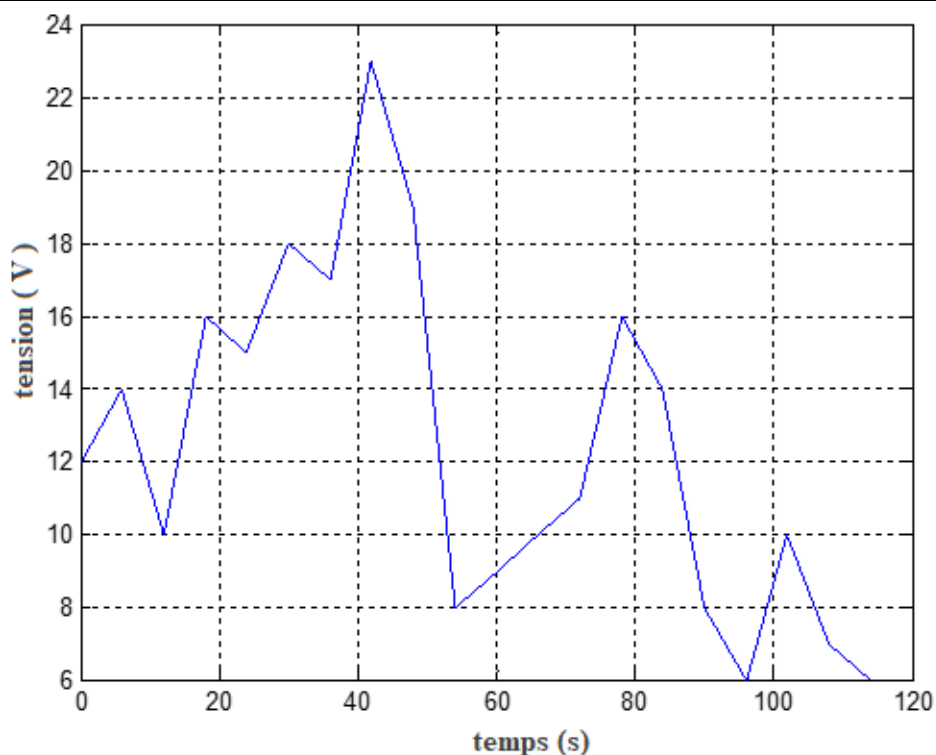


Figure III.7 Les Tensions de la sortie de l'alternateur pour $\beta = 0$

D'après la courbe on remarque que la tension varie en fonction de la vitesse du vent et atteint une valeur maximale à 23 V et une valeur minimale de 6 V

❖ Les valeurs de la tension pour pour $\beta = 2$ sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.4 Tensions à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 2$

$U_{t=0}(V)$	$U_{t=6}(V)$	$U_{t=12}(V)$	$U_{t=18}(V)$	$U_{t=24}(V)$	$U_{t=30}(V)$	$U_{t=36}(V)$	$U_{t=42}(V)$	$U_{t=48}(V)$	$U_{t=54}(V)$
12	8	7	5	10	7	13	17	18	6
$U_{t=60}(V)$	$U_{t=66}(V)$	$U_{t=72}(V)$	$U_{t=78}(V)$	$U_{t=84}(V)$	$U_{t=90}(V)$	$U_{t=96}(V)$	$U_{t=102}(V)$	$U_{t=108}(V)$	$U_{t=114}(V)$
5	4	8	12	13	15	14	12	10	8

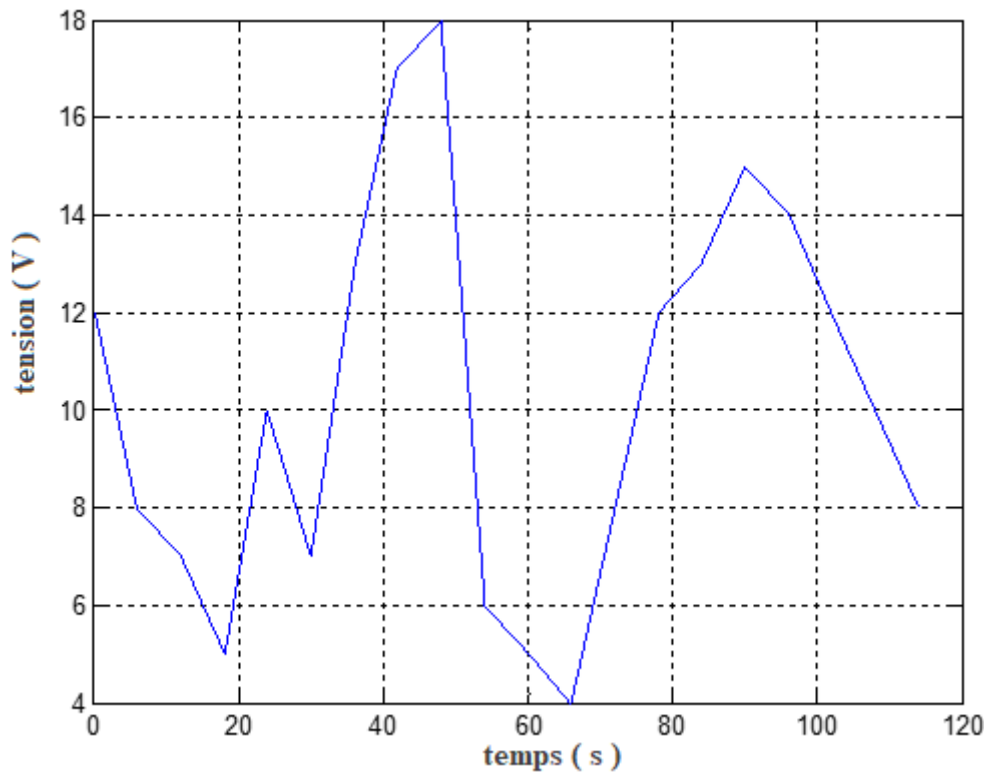


Figure III.8 relevé de tension à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 2$

On remarque que la tension varie en fonction de la vitesse du vent et atteint une valeur maximale de 18 V et une valeur minimale de 4 V

❖ Les valeurs de la tension pour pour $\beta = 4$ sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.5 Relevé de tension à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 4$

$U_{t=0}(v)$	$U_{t=6}(v)$	$U_{t=12}(v)$	$U_{t=18}(v)$	$U_{t=24}(v)$	$U_{t=30}(v)$	$U_{t=36}(v)$	$U_{t=42}(v)$	$U_{t=48}(v)$	$U_{t=54}(v)$
6	10	12	12	11	8	4	2.6	6	9
$U_{t=60}(v)$	$U_{t=66}(v)$	$U_{t=72}(v)$	$U_{t=78}(v)$	$U_{t=84}(v)$	$U_{t=90}(v)$	$U_{t=96}(v)$	$U_{t=102}(v)$	$U_{t=108}(v)$	$U_{t=114}(v)$
9	8	10	6	5	6	4	7	4	2

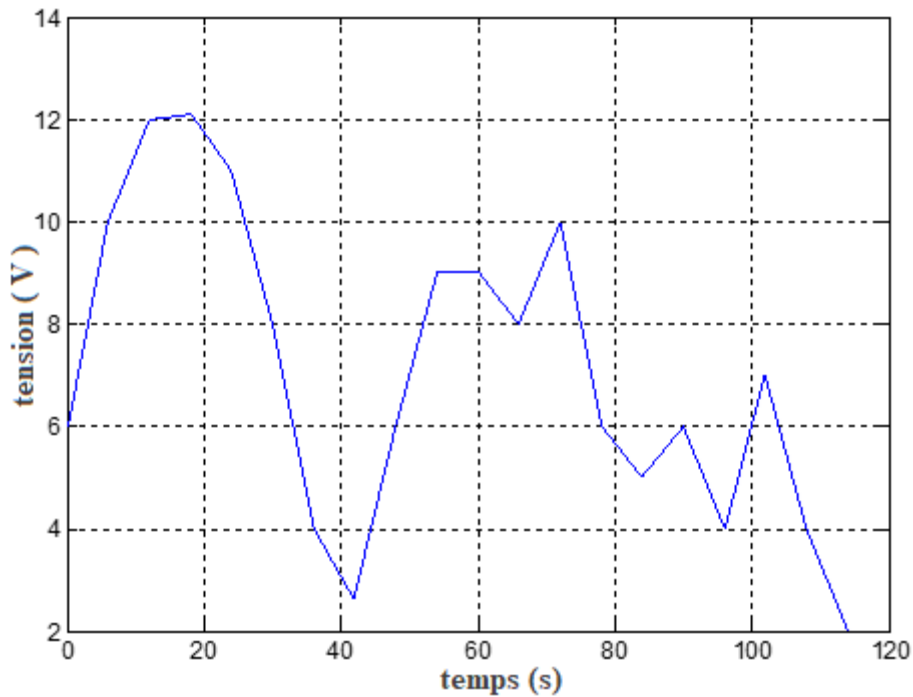


Figure III.9 Tension à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 4$

On remarque que la tensions varie aussi en fonction de la vitesse du vent et elle atteint une valeur maximale de 12 V et une valeur minimale de 2 V

❖ Les valeurs de la tension pour pour $\beta = 6$ sont données dans le tableau suivant :

Tableau III.6 Tension de la sortie de l'alternateur pour $\beta = 6$

$U_{t=0}(v)$	$U_{t=6}(v)$	$U_{t=12}(v)$	$U_{t=18}(v)$	$U_{t=24}(v)$	$U_{t=30}(v)$	$U_{t=36}(v)$	$U_{t=42}(v)$	$U_{t=48}(v)$	$U_{t=54}(v)$
0.8	1.8	3	3.4	3.6	4	3.1	2.8	2.6	2.4
$U_{t=60}(v)$	$U_{t=66}(v)$	$U_{t=72}(v)$	$U_{t=78}(v)$	$U_{t=84}(v)$	$U_{t=90}(v)$	$U_{t=96}(v)$	$U_{t=102}(v)$	$U_{t=108}(v)$	$U_{t=114}(v)$
2.1	1.4	0.7	0.3	0.8	1.2	1.5	0.9	0.6	0.3

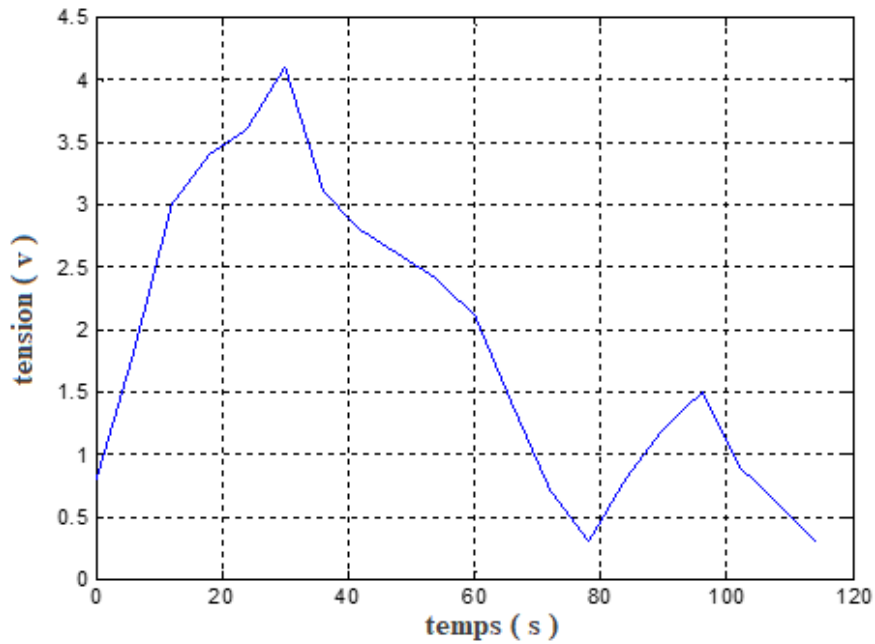


Figure III.10 Tension à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 6$

On remarque que les tensions à la sortie varie aussi en fonction de la vitesse du vent et, atteint une valeur maximale de 4 V et une valeur minimale de 0.5.

Remarque

La valeur de la tension de sortie diminue au fur et à mesure que l'angle d'inclinaison des pales augmente, alors l'angle d'inclinaison des pales affecte négativement sur l'extraction de l'énergie mécanique

IV.5 Etude comparative entre les résultats, pratiques et la simulation numérique

Afin de comparer les résultats obtenus via la simulation numérique à ceux des essais expérimentaux, nous avons superposé les deux graphes (courbe III-11)

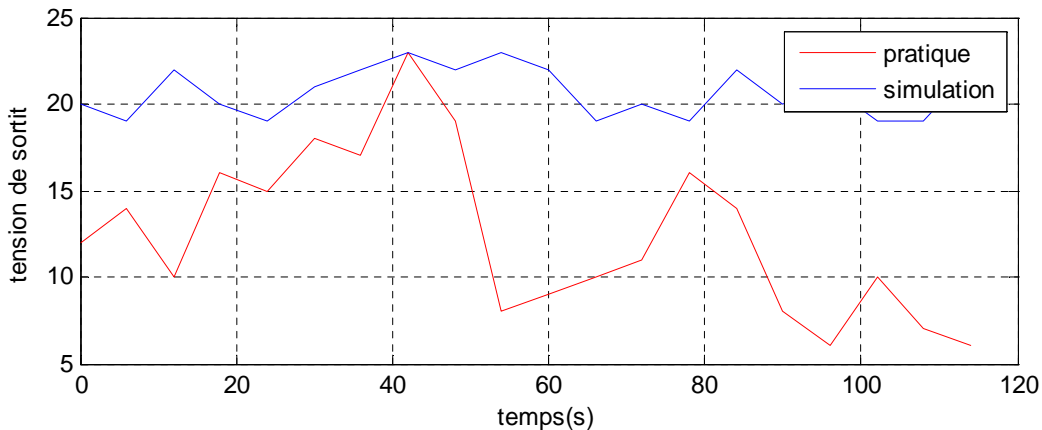


Figure III.11 résultat pratique et théorique à la sortie de l'alternateur pour $\beta = 0$

On voit que les résultats de simulation sont proches à une valeur moyenne de 20 V.

Pour les résultats expérimentaux la variation de la tension est grande, elle varie entre 6 et 16 v. On a ainsi obtenu des pic qui atteint 23 v qui est très proche à la valeur maximale de l'alternateur (24 v). Cette grande fluctuation est due à la variation du vent, aux frottements mécaniques, et aussi à l'équilibrage dynamique.

III.6 Conclusion

L'équilibrage statique et dynamique ont un rôle très important à la stabilité du système, et que l'équilibrage statique seul ne suffit pas alors un équilibrage dynamique est indispensable. Les résultats obtenus dans les essais expérimentaux sont acceptables et encourageantes.

L'angle d'inclinaison ou de calage des pales joue un rôle très important pour augmenter le rendement énergétique. Plus l'angle d'inclinaison est grand plus les valeurs des tensions à la sortie sont réduites.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but la mise en œuvre d'une éolienne à axe horizontale à savoir sa mise en simulation numérique et essais expérimentaux sur un site réel en utilisant les différentes méthodes de maximisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, en traquant le maximum de puissance qu'on peut extraire.

Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, des généralités sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne.

Ensuite une étude aérodynamique a été faite:

- Dans un premier temps pour développer des équations mathématiques qui représente le modèle réel de la chaîne de conversion une brève description sur les systèmes éoliens, dans le but de rechercher de point de puissance maximal MPPT.
- Dans un second temps pour aborder la modélisation des différents constituants du système de conversion d'énergie éolienne, à savoir la turbine, la machine synchrone à aimants permanents qui a le même comportement qu'un alternateur à griffe avec un flux fixe et un redresseur.

Les résultats obtenus sont discutés, et l'observation qui a été retenue c'est que pour les 2 méthodes, la turbine fonctionne en son point optimal.

Et pour la simulation du système complet, une donnée nécessaire doit être connue avant de faire un choix sur le système de conversion éolienne, c'est le profil du vent et sa variabilité.

L'équilibrage statique a été réalisé en rajoutant à l'arrière des pales des masselottes de poids (54 g et 12 g), nous avons observé une stabilité des pales à l'état statique.

L'équilibrage dynamique a demandé un fonctionnement en régime permanent et à grande vitesse pour observer l'équilibre du système.

La partie expérimentale a été réalisée avec succès, les résultats obtenus ont été discutés pour chaque angle d'inclinaison des pales et on a abouti aux résultats suivants :

- ❖ Les résultats pratiques obtenus sont proches des résultats de simulation avec une légère variation dû à la fluctuation du vent.
- ❖ Une tension de 23 V a été enregistrée à la sortie de l'alternateur, l'éolienne a pu donc atteindre sa vitesse nominale, sachant que la tension maximale que peut produire l'alternateur est de 24 V.
- ❖ L'angle d'inclinaison des pales joue un rôle important à la tension de sortie de l'alternateur, plus celui-ci est grand plus la tension mesurée est petite.
- ❖ Des dommages sur l'éolienne ont été recensés à cause des puissantes rafales du vent qui ont provoqué le détachement des pales.

Perspectives :

- ✓ Ajouter un system de sécurité automatisé en utilisant l'angle d inclinaisons des pales
- ✓ Faire un équilibrage dynamique du rotor et pales.

- [1]: <http://tpe-energie-eolienne.e-monsite.com/pages/sommaire/introduction.html>
- [2]: <https://tpeeoliennelll.wordpress.com/introduction/>
- [3]: C. Masson "Wind technology", Department of Mechanical Engineering, Ecole de technologies supérieures SYS84, 2011.
- [4]: CHAZALLON.C «Conception d'éoliennes» INSA de Strasbourg- RIZZO Danien, Mémoire d'ingénieur ,2008
- [5]: K. FERKOUS, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Université Mentouri Constantine, 2009
- [6]: <http://www.em.ucv.ro/eLEE/EN/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/Generalites/GeneralitesEolien1.htm>
- [7]: <https://www.comptoireolien.fr/les-differents-types-d-eoliennes/index.html>
- [8]: KADRI .M.A «Etude numérique de l'écoulement d'air à travers une éolienne Darrieus de type H à pale NACA 4412» Mémoire de Master académique, université de Ouargla ,2015.
- [9]: H. Camblong. «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse de doctorat en Automatique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Centre de Bordeaux, 2003.
- [10]: http://www.eoltec.com/fr/Main_fr.htm
- [11]: Redjem Radia, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ", Université de Medkouri Constantine 2009
- [12]: LAVERDURE N « Sur l'Intégration des Générateurs Eoliens dans les Réseaux Faibles ou Insulaires », Thèse de Doctorat, INPG, France, 2005.
- [13]: Hamecha Samira, «Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Mémoire de Magister ; université Mouloud Mammeri Tizi- Ouzou le 25/06/2013
- [14]: O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », 2002.
- [15]: Laid KHETTACHE. Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentation.
- [16]: O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994, p. 500-

Référence bibliographique

505.

[17]:K.Amine, I.Yacine «Réalisation et caractérisation d'une petite éolienne a axe horizontale
» mémoire de fin de cycle, Université A.Mira Bejaia 2019

Paramètre de générateur éolien

- **Paramètre de la turbine :**

Paramétrés	Valeurs
Rayon de la turbine : R_t [Ω]	1.2
Moment d'inertie : J [N.m]	0.1
Frottement : f [N]	0.06
Coefficient de puissance optimale $C_{p_{opt}}$	0.309
Vitesse spécifique optimale λ_{opt}	2
Rapport de transformation G	3.2

- **Caractéristique de la MSAP**

Parametres	Valeurs
R_s [Ω]	0.457
L_s [H]	0.029
L_r [H]	0.029
Flux[$J \cdot s^{-1}$]	0.13
P [W]	8