



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم

Abdelhamid Ibn Badis University - Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم الهندسة الكهربائية

Department of Electrical Engineering



*Department of Electrical Engineering*

The Date

Ref : ...../U.M/F.S.T/2023

قسم الهندسة الكهربائية

التاريخ :

رقم : ..... /ج.م.ك.ع.ت/2023

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Electrotechnique Industrielle**

### Thème

**Conception d'une alimentation continue pour la MADA de  
l'éolienne en vue de l'amélioration de la continuité de service**

Présenté par

- 1- MOSTEFA Mohamed
- 2- BRAHAMI Abdelaaziz

Soutenu le 12/07/ 2023 devant le jury composé de :

Président :	Mr BENYAMINA Mansour	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr. CHAOUCH Abdallah	MCA	Université de Mostaganem
Encadrante :	Mme GHOMRI Leila	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023

## REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon Dieu de nous avoir guidés et donnée la force et la volonté pour atteindre notre objectif.

Nous tenons à remercier tous ceux et celle qui de loin ou de près a contribué à finaliser ce modeste travail qu'on espère qu'il sera à la hauteur de leur engagement.

Un grand merci à Mr **CHAOUCH Abdallah** qui a accepté de lire notre travail, et pour ses précieux conseils. On le remercie énormément pour tout le temps qu'elle nous a consacré, et qui nous a fait l'honneur d'examiner ce travail.

Un grand merci à **Mr BENYAMINA Mansour** qui nous a fait l'honneur d'être présent parmi les membres de jury et avoir accepté de présider le jury

Un énorme et chaleureux merci à **Mme GHOMRI Leila** qui a su nous faire partager son savoir-faire et sa rigueur scientifique, pour son aide précieux, sa disponibilité, son encouragement et ces conseils durant toute la durée de notre travail.

Un grand merci à Mme Guerzou Tourkia et Mme Mostefa Fouzia pour leurs aides durant tout le cursus.

Nous sommes reconnaissants à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation avec beaucoup de dévouement et de compétence.

## *Dédicace*

Je voudrais dédier ce modeste travail à

Mes chers parents pour lesquels les mots ne suffiront pas pour témoigner toute ma gratitude pour leur entière disponibilité, assistance et dévouements tout au long de mon cursus et la réalisation de ce travail.

Ma chère tante MOSTEFA Fouzia

Mon frère Abdelmajide

Mes chères sœurs

A tous la famille MOSTEFA

A mes chers collègues de promo Electrotechnique industrielle

**MOSTEFA MOHAMED**

## *Dédicace*

A qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est qu'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 :

A toute la famille BRAHAMI.

A toute la famille MOSTEFA

A mes amis.

A tous ceux dont les noms m'ont échappé

**BRAHAMI Abdelaaziz**

## **Résumé**

L'énergie éolienne est une importante source d'énergie renouvelable pour la production d'électricité. Mais son intermittence et sa dépendance aux conditions météorologiques réduisent son rendement.

Dans ce contexte, des nombreuses recherches ont été menées pour améliorer la production d'énergie et assurer une production d'électricité plus stable et plus efficace.

Le stockage sous ses différentes formes reste un domaine de recherche et d'application prometteur pour compenser cette contrainte météorologique et améliorer le rendement.

Ce travail propose une nouvelle solution pour améliorer les performances des éoliennes en introduisant un système basé sur un volant d'inertie liée à un moteur à courant continue implanter dans la nacelle. Ce système va compenser temporairement l'intermittence de vent pendant des courtes durées qui ne dépasse pas (60s).

**Mots clé :** Energie éolienne, Energie renouvelable, Volant d'inertie, moteur à courant continu, la nacelle.

**Abstract**

Wind energy is an important source of renewable energy for electricity generation. But its intermittency and dependence on weather conditions reduce its performance.

In this context, a great deal of research has been conducted to improve energy production and ensure more stable and efficient electricity production.

Storage in its various forms continues to be a promising area of research and application to offset this weather stress and improve efficiency.

This work proposes a new solution to improve the performance of wind turbines by introducing a system based on a flywheel linked to a continuous current engine implanted in the nacelle. This system will temporarily compensate for the intermittent wind during short periods that do not exceed (60s).

**Keywords:** Wind energy, renewable energy, wind turbines, flywheel, continuous current engine.

## الملخص

تعد طاقة الرياح مصدرًا مهمًا للطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء لكن تقطعها واعتمادها على الأحوال الجوية يقلل من أدائها وفي هذا السياق أُجري قدر كبير من البحوث لتحسين إنتاج الطاقة وضمان إنتاج كهرباء أكثر استقرارًا وكفاءة.

لا يزال التخزين بأشكاله المختلفة مجالًا واعدًا للبحث والتطبيق لتعويض هذا القيد الجوي وتحسين الأداء.

يقترح هذا العمل حلاً جديدًا لتحسين أداء توربينات الرياح من خلال إدخال نظام يعتمد على دولاب الموازنة مرتبط بمحرك تيار مستمر موضوع داخل القمرة. سيعوض هذا النظام مؤقتًا عن الرياح المتقطعة خلال فترات قصيرة لا تتجاوز 60 ثانية.

**الكلمات المفتاحية:** طاقة الرياح، الطاقة المتجددة، توربينات الرياح، دولاب الموازنة، محرك تيار مستمر، القمرة

**SOMMAIRE**

Dédicace.	
Remerciement	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Sommaire	I
Liste des tableaux	IV
Liste des Figures	V
Liste d'abréviation	VII
Introduction Générale	1
<b>CHAPITRE I : GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE</b>	
I.1. Introduction	5
I.2. Définition d'énergie éolienne	5
I.3. Différents types d'aérogénérateurs et principe de fonctionnement	6
I.3.1. Les éoliennes à axe vertical	6
I.3.2. Les éoliennes à axe horizontal	7
I.4. Classification selon de taille	10
I.5. Les Composants de l'éolienne	10
I.5.1. La mat (la tour)	11
I.5.2. Le rotor	11
I.5.3. La nacelle	12
I.6. Eoliennes à vitesse fixe	13
I.7. Eoliennes à vitesse variable	13
I.8. La limite de Betz	14
I.9. Génératrice et transmission	16
I.9.1. Génératrice synchrone	16
I.9.2. Génératrice asynchrone	16



I.9.3. Machine asynchrone (MAS) à cage	17
I.9.4. Machine asynchrone à double alimentation (M.A.D.A)	17
I.10. Le rendement	17
I.11. Conclusion	18
<b>CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DE LA CHAINE EOLIENNE</b>	
II.1. Introduction	20
II.2. Structure de la machine et configuration électrique :	20
II.3. Paramètre de la machine	21
II.3.1. Vitesse de synchronisme	21
II.3.2. Glissement	21
II.4. Les modes de fonctionnement	22
II.4.1. Mode moteur hyposynchrone	22
II.4.2. Mode moteur hypersynchrone	22
II.4.3. Génératrice hyposynchrone et hypersynchrone:	22
II.5. La modélisation de la chaine éolienne	23
II.5.1 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	23
II.5.2 Transformation de PARK	26
II.6. La modélisation de la turbine éolienne	29
II.6.1. Modélisation de multiplicateur	29
II.6.2. Modélisation de l'arbre de la machine	29
II.7. Etape de simulation	30
II.8. Résultats et analyses	30
II.8.1. Fonctionnement avec vitesse de vent fixe	30
II.8.2. Fonctionnement avec diminution de vitesse de vent	31
II.9. Conclusion	33

**CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE STOCKAGE  
D'ENERGIE PAR LE VOLANT D'INERTIE**

III.1	Introduction	35
III.2	Historique	35
III.3	Fonctionnement	36
III.4	Avantages et inconvénients	37
III.5	Théorie des volants d'inertie	37
III.5.1	Dimension du système de stockage d'énergie par le volant d'inertie	37
III.5.2	Caractéristiques de la génératrice	38
III.5.3	Caractéristiques du moteur à courant continu	38
III.6	Finalement	51
III.7	Conclusion	52

**CHAPITRE IV : OPTIMISATION DU TEMPS DE FONCTIONNEMENT PAR  
L'INTRODUCTION D'UN VOLANT D'INERTIE**

IV .1	Introduction	54
IV.2	Proposition de la nouvelle Architecture du procédé	54
IV.3.	Rappel	55
IV.4	Résultat	55
IV.5	Conclusion	57
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		59
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>		61
<b>ANNEXE</b>		64

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE I : GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE

<b>Tableau I.1</b> : les avantages et inconvénients des éoliennes	9
<b>Tableau I.2</b> : Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé	10
<b>Tableau I.3</b> : les différents composants d'éolienne	12
<b>Tableau I.4</b> : Avantages et inconvénients entre les deux types éoliens.	14

### CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE PAR LE VOLANT D'INERTIE

<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques géométriques des poulies du système de stockage de volant d'inertie	39
<b>Tableau III.2</b> : Caractéristiques géométriques des poulies du système de stockage de volant	47
<b>Tableau III.3</b> : Paramètres du système de stockage d'énergie de volante inertie.	51

### CHAPITRE IV : OPTIMISATION DU TEMPS DE FONCTIONNEMENT PAR L'INTRODUCTION D'UN VOLANT D'INERTIE

<b>Tableau IV.1</b> : illustrations des paramètres	55
--	----

### ANNEXE

<b>Tableau (A.1)</b> : Valeurs des paramètres du réseau pour la simulation d'un DFIG	64
--	----

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I : GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE

<b>Figure (I.1)</b> : mécanisme de production de l'énergie électrique par l'éolienne	5
<b>Figure (I.2)</b> : a) et b) deux éoliennes du type Darrieus, c) une éolienne type Savonius, d) une éolienne combinant les technologies Darrieus et Savonius	6
<b>Figure (I.3)</b> : différents types d'éolienne à axe vertical	7
<b>Figure (I.4)</b> : Mécanisme de fonctionnement de l'éolienne à axe horizontal	8
<b>Figure (I.5)</b> : Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.	8
<b>Figure (I.6)</b> : Illustration de la relation entre le diamètre du rotor et la puissance électrique de sortie basée sur les données techniques de 62 modèles récents d'éoliennes.	10
<b>Figure (I.7)</b> : Différents types de tours	11
<b>Figure (I.8)</b> : Rotor Liebherr	11
<b>Figure (I.9)</b> : Les composants de la nacelle	12
<b>Figure (I.10)</b> : éolienne à vitesse fixe	13
<b>Figure (I.11)</b> : Représentation du tube de courant	14
<b>Figure (I.12)</b> : Représentation des performances des différents types d'éolienne	16

### CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DE LA CHAINE EOLIENNE

<b>Figure (II.1)</b> : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation	21
<b>Figure (II.2)</b> : Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par deux convertisseurs statiques	23
<b>Figure (II.3)</b> : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.	24
<b>Figure (II.4)</b> : Passage du triphasé au biphasé.	26
<b>Figure (II.5)</b> : Schéma d'une turbine éolienne.	29
<b>Figure (II.6)</b> : Schéma de principe de simulation avec vitesse fixe	30
<b>Figure (II.7)</b> : la vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor en fonction du temps	31
<b>Figure (II.8)</b> : la puissance mécanique de la turbine en fonction de temps	31

<b>Figure (II.9) :</b> le couple mécanique de la turbine en fonction du temps	31
<b>Figure (II.10) :</b> la vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor en fonction du temps.	32
<b>Figure (II.11) :</b> la puissance mécanique de la turbine en fonction de temps	32
<b>Figure (II.12) :</b> le couple mécanique de la turbine en fonction du temps	32

### **CHAPITRE III : DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE PAR LE VOLANT D'INERTIE**

<b>Figure (III.1) :</b> Volant d'inertie de moteur automobile	35
<b>Figure (III.2) :</b> Volant d'inertie de moteur automobile	36
<b>Figure III.3 :</b> dimension géométrique du système de stockage d'énergie du volant d'inertie.	37
<b>Figure (III.4) :</b> dimension géométrique de poulie.	38
<b>Figure (III.5) :</b> partis de volant d'inertie.	48

### **CHAPITRE IV : OPTIMISATION DU TEMPS DE FONCTIONNEMENT PAR L'INTRODUCTION D'UN VOLANT D'INERTIE**

<b>Figure (IV.1) :</b> Schéma proposée pour l'optimisation de rendement	54
<b>Figure (IV.2) :</b> Schéma de principe de simulation avec volant d'inertie	55
<b>Figure (IV.3) :</b> la vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor en fonction du temps	56
<b>Figure (IV.4) :</b> la puissance mécanique de la turbine en fonction de temps	56
<b>Figure (IV.5) :</b> le couple mécanique de la turbine en fonction du temps	57

**LISTE DES ABREVIATIONS**

$\rho$	La masse volumique de l'air ( $kg.m^{-3}$ ).
S1	La section amont du tube d'air.
S2	La section aval du tube d'air.
V1	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.
V2	La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur
V	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
F	Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
Cp	Le coefficient de puissance.
$\gamma$	La vitesse spécifique $\gamma$
f	Fréquence en Hz.
P	Nombre de paires de pôle.
g	Le glissement en pourcentage.
Ns	Vitesse de synchronisme en tr/min.
Nr	La vitesse de rotation du rotor en tr/min.
R <sub>s</sub>	La résistance statorique par phase.
R <sub>r</sub>	La résistance rotorique par phase.
V <sub>s</sub>	Les tensions statoriques de la machine.
V <sub>r</sub>	Les tensions rotoriques de la machine.
$\phi_s$	Les flux statoriques de la machine.
$\phi_r$	Les flux rotoriques de la machine.
M <sub>s</sub>	Inductances mutuelles entre deux phases statoriques.
M <sub>r</sub>	Inductances mutuelles entre deux phases rotoriques.
M	l'inductance magnétisante.
M <sub>sr</sub>	La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.
L <sub>s</sub>	Les inductances cycliques statoriques de la machine.
L <sub>r</sub>	Les inductances cycliques rotoriques de la machine.
l <sub>s</sub>	Inductances propres statorique.
l <sub>r</sub>	Inductances propres rotorique.
$\Theta$	L'angle de rotation du rotor par rapport au stator
J	Moment d'inertie du rotor
$\omega$	Vitesse angulaire (mécanique) du rotor.

---

$f_r$	Coefficient de frottement visqueux.
$C_{em}$	Couple électromagnétique délivré par le moteur
$C_r$	Couple résistant, ou de charge.
$G$	Gain du multiplicateur
$J_t$	Les inerties de la turbine.
$J_m$	Les inerties de la machine.
$f_m$	Le coefficient de frottement de la machine
$f_t$	Le coefficient de frottement des pales
$C_g$	Le couple statique fournie par l'éolienne
$C_g$	Le couple nominal de Dc moteur.
$C_v$	Le couple nominal de volant d'inertie.
$d_1$	Diamètre de poulie.
$d_a$	Diamètre d'arbre de poulie.
$d_c$	Diamètre de center de poulie.
$D1$	Diamètre de poulie (1) de moteur
$B$	Largeur de poulie.
$b$	Largeur de courroie
$t$	Epaisseur de poulie
$T$	Le couple maximum de transmission.
$\tau$	Contrainte de flexion
$C_m$	Le couple nominal de la génératrice.
$E_c$	Énergie cinétique
$J$	Moment d'inertie
$J_{volant}$	Moment d'inertie de volant d'inertie Kg.m <sup>2</sup> .
$L$	Langueur de courroie
$E$	Energie cinétique de volant d'inertie (j).
$P_{ch}$	La puissance de la génératrice éolienne.
$\Delta t$	La durée de stockage.
$\omega_{max}$	Vitesse angulaire maximum de volant d'inertie (rad/s).
$\omega_{min}$	Vitesse angulaire minimum de volant d'inertie (rad/s).
$N2$	Vitesse de rotation de moteur Asynchrone triphasé (tr/min).
$R$	Rayon de volant d'inertie (m).
$m$	Masse de volant d'inertie (Kg)

---

# **Introduction Générale**



## INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine de l'énergie, la continuité de service dans la production de l'énergie est sans aucun doute cruciale.

De toutes les sources potentielles d'énergie renouvelable (comme le soleil, le vent, etc.), l'énergie éolienne est aujourd'hui la plus accessible en termes de technologie et de coûts, c'est donc tout naturellement qu'elle est sur le point de jouer un rôle important dans la composition globale des sources d'énergie mondiales.

Au début des années 1970, la première crise pétrolière a provoqué un regain d'intérêt pour l'éolien. Cependant, l'accent a été mis sur l'utilisation de l'énergie éolienne pour générer de l'énergie électrique au lieu de l'énergie mécanique. Cette modification de l'orientation a permis la possibilité d'employer des technologies énergétiques supplémentaires pour fournir une source d'énergie fiable et stable.

Au début du XXe siècle, les premières éoliennes conçues pour produire de l'électricité avaient déjà été inventées. Depuis, la technologie a connu des améliorations progressives à partir du début des années 70. À la fin des années 90, l'énergie éolienne a de nouveau pris de l'importance comme l'une des sources d'énergie durable les plus importantes et les plus durables (Gasmi,2014).

Le problème majeur des énergies renouvelables en général, et de l'énergie éolienne en particulier est certainement l'intermittence de la production due aux conditions météorologiques.

Il existe de nombreuses solutions pour le stockage de l'énergie. Le stockage par les batteries est l'un des moyens les plus courants pour assurer une production acceptable. Il existe aussi d'autres moyens comme les volants d'inertie (Ludovic, 2004).

Nous avons proposé dans notre travail d'apporter une solution innovante en ajoutant un système à base de volant d'inertie pour augmenter le rendement des éoliennes. Ce système sera implémenté dans la nacelle pour assurer la continuité de service.

C'est donc dans ce contexte que nous allons développer notre étude à travers les chapitres suivants :

Le premier chapitre est consacré aux composants des systèmes de conversions de l'éolienne, ses différents types, sa description et son fonctionnement.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, on présentera la structure de la machine et les modes de fonctionnement de la MADA. Ce système sera modélisé en commençant par le modèle

dynamique de la machine dans les plans ABC et dq. A la fin, on réalisera une modélisation de l'éolienne et simuler le système avec le logiciel matlab-simulink en deux parties. Dans la première simulation la vitesse du vent sera fixée à 11 (m/s). Dans la deuxième partie la vitesse sera dégradée en continu jusqu'à annulation.

Le troisième chapitre présentera l'étude et le dimensionnement du volant d'inertie et les quatre poulies qui s'adapteront au système.

Enfin, dans quatrième chapitre, on présentera les résultats obtenus sur l'efficacité du système ainsi que son rendement.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et exposer quelques perspectives de recherche envisagées.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur l'énergie éolienne**

## GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE

### I.1. Introduction

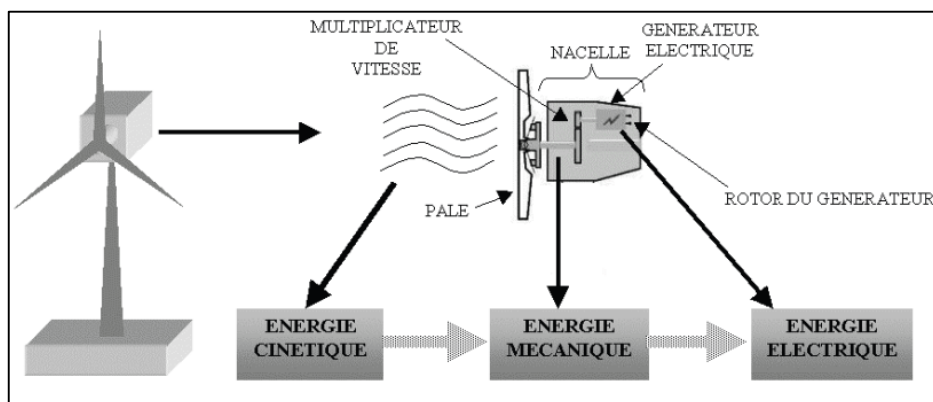
La production d'énergie renouvelable et propre est un défi auquel le monde fait face depuis des décennies. En définition, elle est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. Multi-systèmes ont été développés dans ce sens. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution.

L'énergie éolienne est l'un des systèmes développés depuis le siècle dernier. Un système émergeant avec facilité de son installation et utilisation, dans ce chapitre on parlera de ce système avec détail.

### I.2. Définition d'énergie éolienne

L'énergie du vent appelée communément l'énergie éolienne est forme d'une énergie renouvelable,

Une éolienne est une machine qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent exerce une force sur le rotor de l'éolienne et le met en rotation, ce dernier génère une énergie mécanique qui sera convertie en énergie électrique par la génératrice couplée à l'éolienne. La génératrice crée du courant continu ou alternatif. Elle est reliée à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie (figure I.1). Une éolienne produisant de l'électricité est parfois qualifiée d'aérogénérateur (Zerari 2015).



**Figure (I.1) :** mécanisme de production de l'énergie électrique par l'éolienne

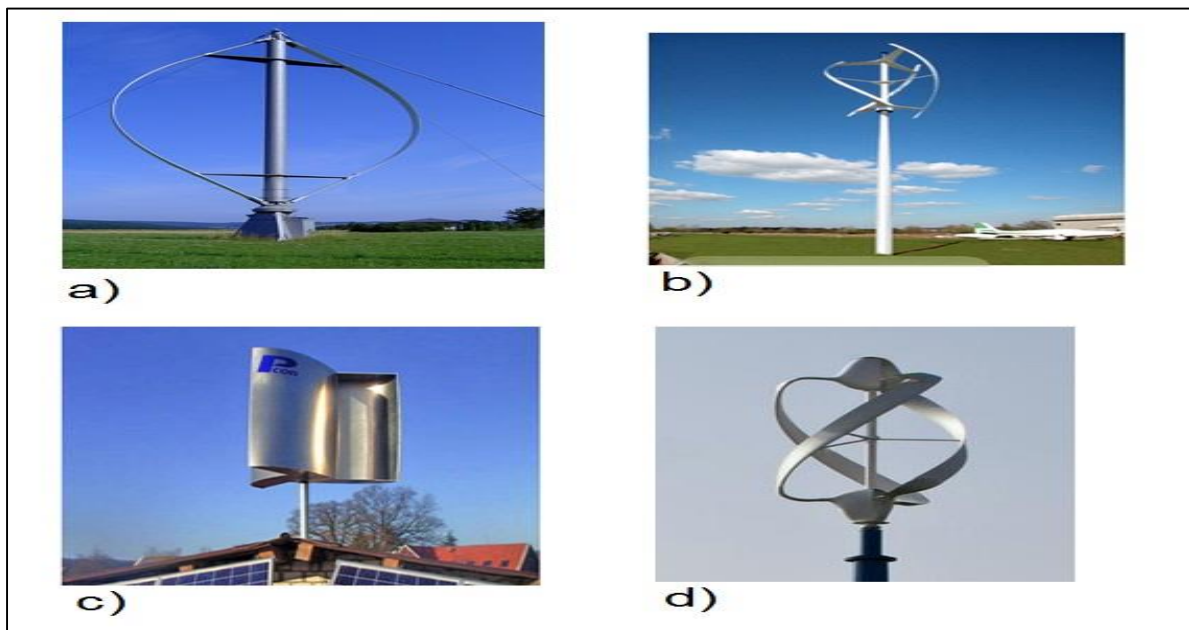
### I.3. Différents types d'aérogénérateurs et principe de fonctionnement

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé est assez bien venté. De tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité. Il existe deux types d'éoliennes modernes : le système à axe horizontal et à axe vertical. Les plus courants sont celles à axe horizontal.

#### I.3.1. Les éoliennes à axe vertical

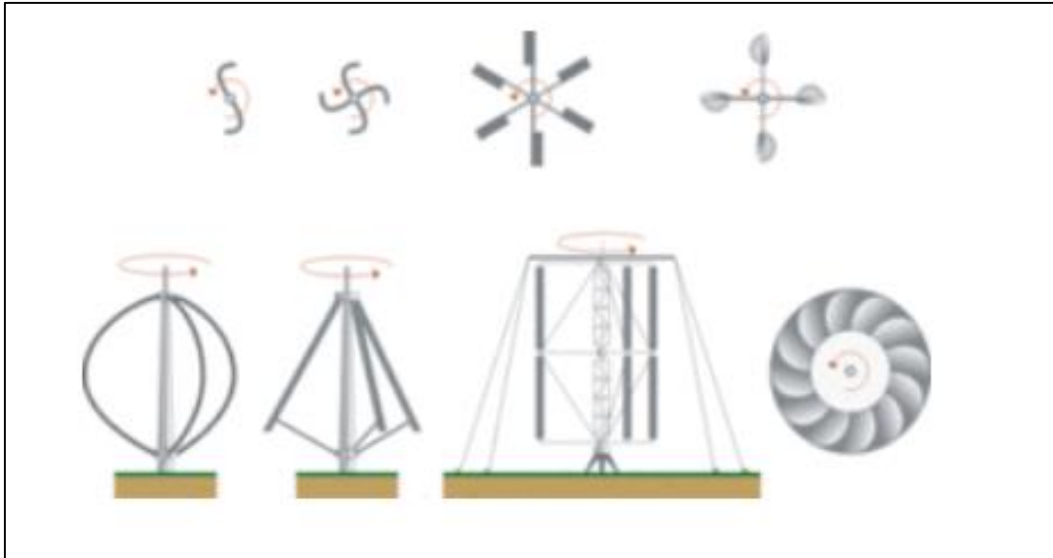
Les éoliennes à axe **vertical** (*VAWT, vertical axis wind turbine*) sont utilisées pour les applications de petite voire de moyennes puissances. On distingue deux grandes familles parmi les éoliennes à axe vertical, on trouve les éoliennes de modèle "Darrieus" (figure I.2 ; a ,b.) et le modèle de "Savonius" (figure I.2 ;c) et le modèle combiné (figure I.2 ;d).

Les pales de l'éolienne à axe vertical tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique (figure I.3). Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être plus fréquemment exploitée. Elle demande moins d'espace qu'une éolienne à axe horizontal. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments et peut fonctionner quel que soit le sens du vent, par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne à axe horizontal (Axenne,2008)



**Figure (I.2) :** a) et b) deux éoliennes du type Darrieus, c) une éolienne type Savonius, d) une éolienne combinant les technologies Darrieus et Savonius

[http://ulm5305.phpnet.org/wp\\_content/uploads/2018/09/art088](http://ulm5305.phpnet.org/wp_content/uploads/2018/09/art088)



**Figure (I.3) :** différents types d'éolienne à axe vertical

### **I.3.2. Les éoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT, horizontal axis wind turbine) sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical (Philippe et al,2009). Elles sont composées à la base d'un mât sur lequel est placée la nacelle. Cette nacelle contient la génératrice ainsi que le système de transmission, c'est-à-dire les éléments d'accouplement mécanique entre le rotor et la génératrice. Celle-ci convertit l'énergie mécanique en énergie électrique (Chazallon et al,2008). En suivant le sens de parcours du vent, le rotor peut être placé en amont ou en aval de la nacelle. Lorsque le rotor se situe en amont, il faut un dispositif particulier pour que l'éolienne se positionne correctement (figure I.4).

Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 profilées aérodynamiques, elles peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts) et leur axe de transmission est parallèle au sol (Philippe et al,2009). On peut faire une distinction entre les éoliennes suivant le nombre de pales figure (I.5).

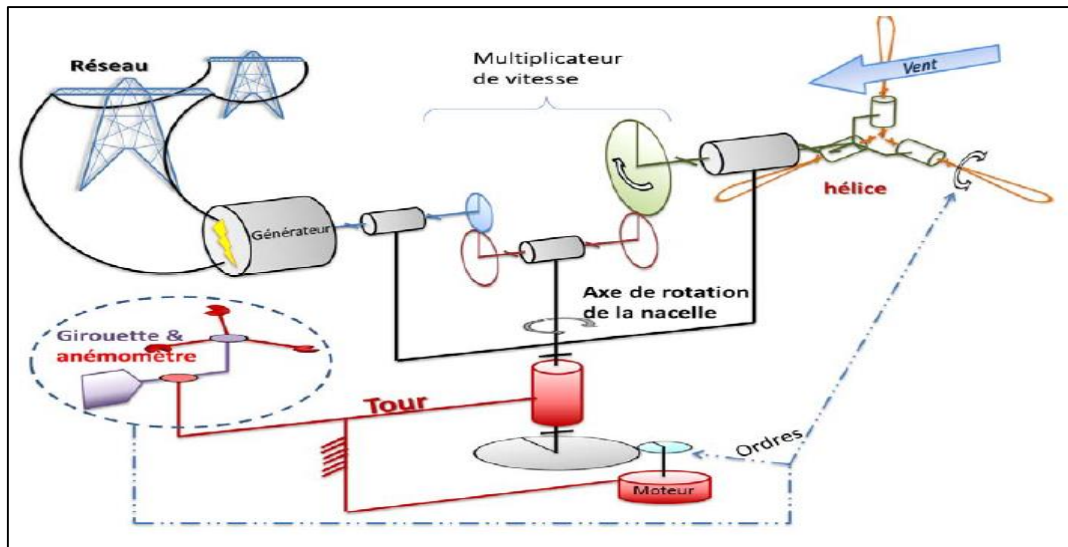


Figure (I.4) : Mécanisme de fonctionnement de l'éolienne à axe horizontal

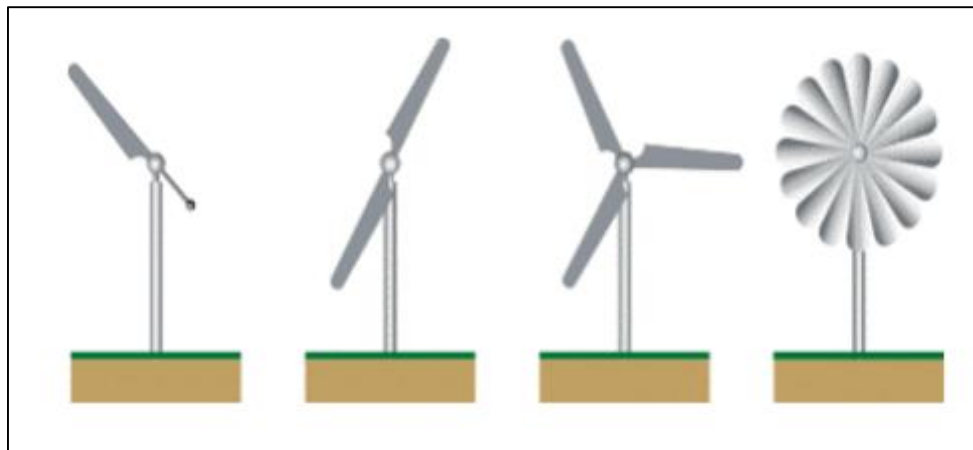


Figure (I.5) : Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.

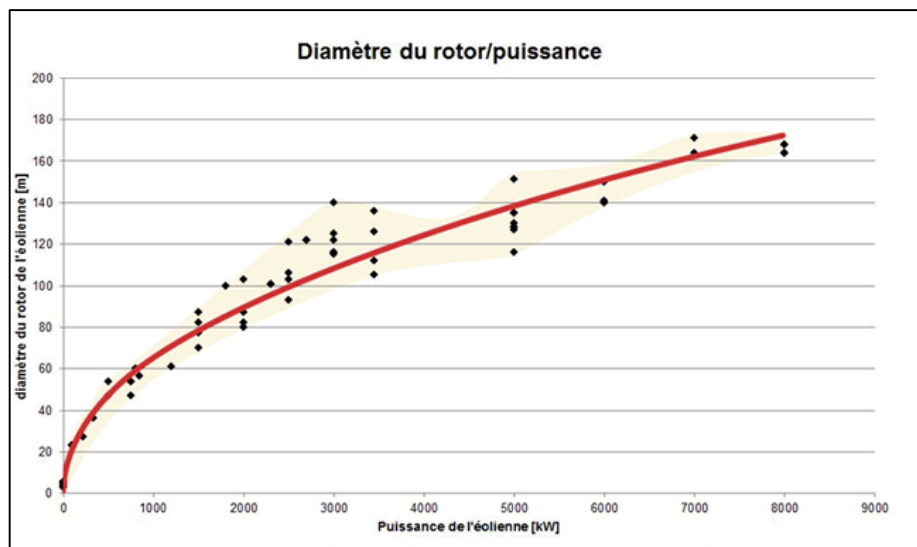
**Tableau I.1** : les avantages et inconvénients des éoliennes (Haritza.2003)

	Les avantages	Les inconvénients
L'énergie éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie renouvelable, qui respecte l'environnement.</li> <li>• Une énergie sans risque contrairement aux énergies fossiles et nucléaire.</li> <li>• Les parcs éoliens se démontent très facilement en ne laissant pas de trace.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor,</li> <li>• La puissance électrique produite n'est pas constante.</li> <li>• Le coût reste encore plus élevé.</li> </ul>
Éolienne à axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande puissance</li> <li>• Les grandes pales permettent d'obtenir des grandes vitesses de rotation et rendement en puissance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La taille d'aérogénérateur se met trop évidence même une longue distance ce qui produit une pollution visuelle.</li> <li>• Les grandes vitesses doivent être contrôlées afin d'empêcher l'endommagement du système.</li> <li>• L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident</li> </ul>
Éolienne à axe vertical	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fournir de l'énergie quelle que soit la direction du vent.</li> <li>• Pas besoin d'un gros support pour le mât,</li> <li>• Le coût de construction et d'entretien est inférieur à celui de l'axe horizontal</li> <li>• Installation et déplacement facile.</li> <li>• Peut être installé en site urbain.</li> <li>• Pas très dangereux pour les oiseaux car les pales tournent à faible vitesse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le flux d'air près du sol crée des turbulences provoquant de fortes vibrations.</li> <li>• le rendement est plus faible par rapport à l'axe horizontal.</li> <li>• L'éolienne nécessite une poussée initiale pour démarrer</li> <li>• nécessite des câbles pour renforcer le système,</li> </ul>



### I.4. Classification selon de taille

Théoriquement, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance d'une éolienne. En fait, cette puissance dépend principalement de la surface balayée par le rotor, qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. La figure (I.6) montre la relation entre le diamètre et la puissance obtenue. Le tableau (I.1) montre les désignations de taille et les grandeurs des puissances pertinentes. Il convient de noter que la puissance a plus à voir avec la vitesse du vent et le balayage.



**Figure (I.6) :** Illustration de la relation entre le diamètre du rotor et la puissance électrique de sortie basée sur les données techniques de 62 modèles récents d'éoliennes.

**Tableau I.2 :** Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé

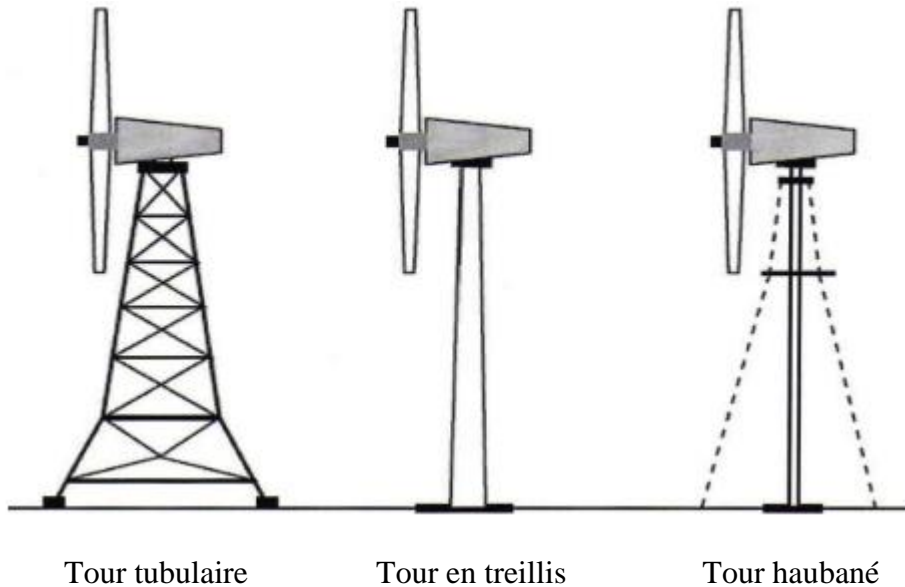
Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m <sup>2</sup> ]	Puissance [kw]
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.1-0.4
Mini	1.25-3	1.2-7.1	0.4-2
Domestique	3-10	7-79	2-30
Petite commerciale	10-20	79-314	30-120
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	120-750
Grand commerciale	50-100	1963-7854	750-3000
Géante commerciale	100-170	7854-22686	3000-8000

### I.5. Les Composants de l'éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes (DELORD 2015). Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :

### I.5.1. La mat (la tour)

L'un des principaux composants d'une éolienne qui supporte l'ensemble (la nacelle et le rotor) pour éviter que les pales ne touchent le sol généralement fixé sur une fondation implantée dans le sol, qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne, trois grands types de tour peuvent se rencontrer (Figure I.8)



Tour tubulaire

Tour en treillis

Tour haubanée

**Figure (I.7) :** Différents types de tours (M. Sathyajith 2006)

### I.5.2. Le rotor

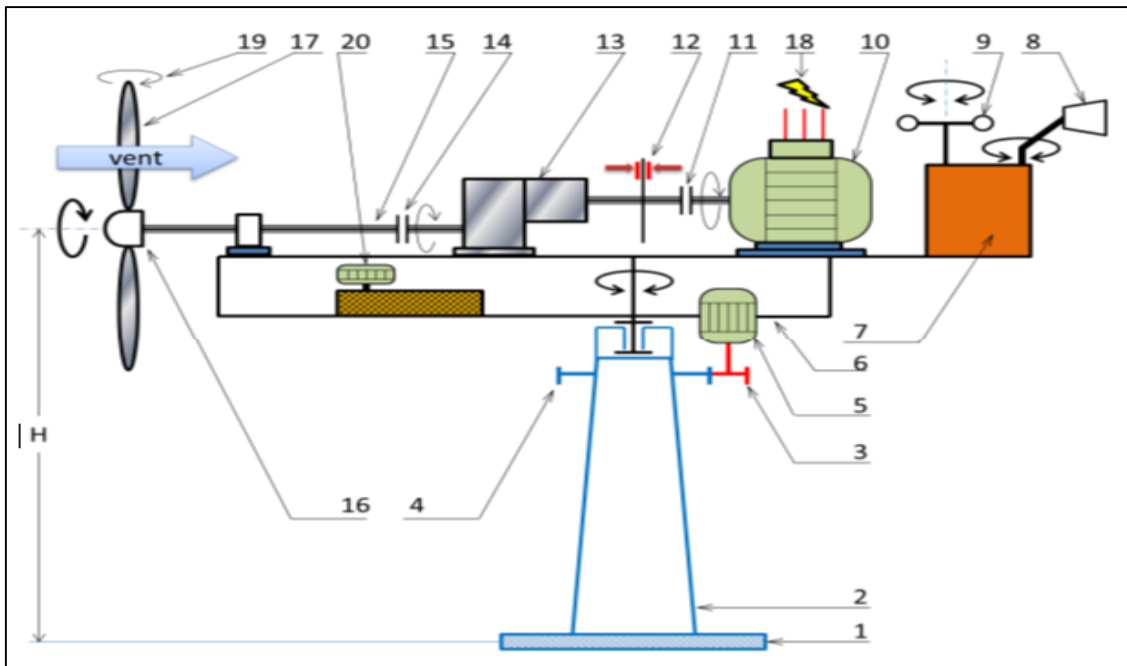
C'est l'élément qui capte l'énergie du vent pour la transformer en énergie mécanique, qui sera transformée par la suite en énergie électrique. Il est constitué des pales (d'un nombre variable), de l'arbre primaire, d'un moyeu, où ce dernier assure la liaison entre ces éléments



**Figure (I.8) :** Rotor Liebherr  
([www.liebherr.com](http://www.liebherr.com))

**I.5.3. La nacelle**

Le cœur de l'aérogénérateur, située en haut de la tour qui comporte toute l'installation de production d'électricité : le multiplicateur, le (ou les) générateur(s), les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. (Figure I.10)



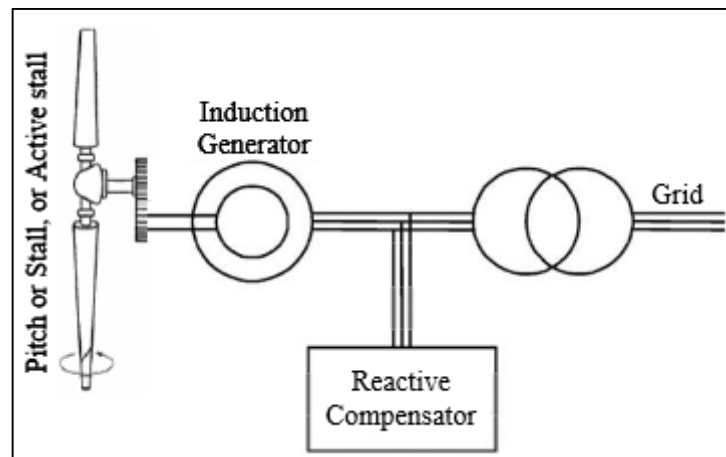
**Figure (I.9) :** Les composants de la nacelle (Delord Jean- David,2015)

**Tableau I.3 :** les différents composants d'éolienne

Repère	Désignation	Repère	Désignation
01	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
02	Tour	12	Frein à disque
03	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
04	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
05	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
06	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
07	Unité centrale	17	Pale à pas variable
08	Girouette	18	Réseau électrique
09	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique

**I.6. Eoliennes à vitesse fixe**

Les éoliennes à vitesse fixe tournent à une vitesse relativement constante (Adnane 2014). Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice (figure I.11). Le rendement de conversion maximum est calculé en fonction d'une vitesse donnée du vent. A fur et à mesure que la vitesse du vent change, le système devient moins efficace et la puissance électrique produite est très fluctuante. C'est pourquoi généralement, la turbine est protégée des éventuelles rafales de vent par un contrôle aérodynamique, où la puissance peut être limitée d'une manière aérodynamique à l'aide d'un contrôle de décrochage, un contrôle actif de décrochage ou via le contrôle de calage. Ce système est directement connecté sur le réseau d'énergie électrique. Cela veut dire que on n'a pas à prévoir une relation entre la sortie de la génératrice et le réseau. En effet il est prévu que le couple moteur aérodynamique est égale au couple résistif électrique



**Figure (I.10):** éolienne à vitesse fixe

**I.7. Eoliennes à vitesse variable**

L'efficacité de la conversion d'énergie peut être obtenue sur une large gamme de vitesses de vent. La turbine, qui change constamment sa vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent pour maximiser la puissance, est connectée au réseau via un convertisseur de puissance (Adnane 2014) situé sur le circuit du rotor. Contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, la tension et la fréquence en sortie du générateur ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. Le contrôle de l'onduleur maintient la tension du bus constante. Dans ce cas le couple moteur aérodynamique est différent du couple résistif électrique

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients entre les deux types éoliens. (Adnane 2014)

Mode de fonctionnement	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple, robuste, fiable.</li> <li>• Faible coût de construction et maintenance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement de conversion d'énergie faible</li> <li>• Fort stress mécanique qui augmente le coût de la structure devant supporter ceci</li> <li>• Fluctuation importante de la puissance</li> </ul>
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fort rendement de conversion d'énergie</li> <li>• Puissance électrique de meilleure qualité</li> <li>• Stress mécanique réduit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs</li> <li>• Contrôle du système plus compliqué</li> </ul>

### I.8. La limite de Betz

Les premiers travaux pour évaluer le rendement d'une hélice datent du XIX siècle avec Rankine et Froude (Marc, Jean-Marc 2019). Pour simplifier, les hypothèses retenues sont celles d'un fluide parfait et incompressible, on peut alors utiliser les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie pour évaluer les performances d'un rotor (Figure I.12).

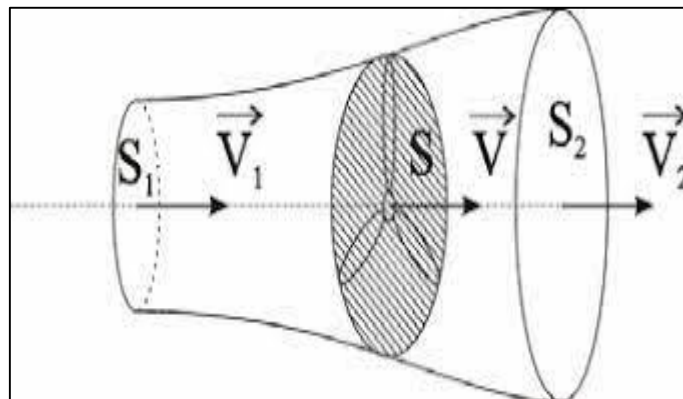


Figure (I.11) : Représentation du tube de courant

- L'écoulement en amont est supposé uniforme de vitesse  $V_0$ . Dans le cas d'une éolienne, le flux d'air traversant le disque rotor de surface  $S$  est ralenti et lui fournit de l'énergie (figure I.12). On a donc naturellement :

$$V_1 > V > V_2 \tag{I.1}$$

- La loi de conservation de la quantité de mouvement donne les égalités suivantes :

$$S_1 \cdot V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2 \quad (\text{I.2})$$

- En notant ( $\rho$ ) la masse volumique de l'air (en  $kg \cdot m^{-3}$ ), la puissance absorbée par le rotor s'exprime sous la forme suivante :

$$P = \rho \cdot S \cdot V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{I.3})$$

- La variation de l'énergie cinétique de la masse d'air par seconde est donnée par :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.4})$$

- En effectuant le bilan énergétique, l'égalité des expressions (1) et (2) donne :

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (\text{I.5})$$

- En dérivant l'expression de la puissance P par rapport à la vitesse  $V_2$  et en étudiant sa variation, on obtient alors une seule racine physique correspondant au maximum de la puissance absorbée par le rotor :

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (\text{I.6})$$

Soit:

$$P_{\max} = \rho \cdot S \cdot \left(\frac{2}{3} V_1\right)^2 \left(\frac{2}{3} V_1\right) = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3\right) \quad (\text{I.7})$$

soit  $\frac{16}{27} \approx 0.593$  représente la fraction maximale de l'énergie passant dans le tube de courant théoriquement récupérable. Elle a été établie en 1920 par Albert Betz. Mais, de par les hypothèses utilisées qui ne sont pas vérifiées dans la réalité, cette limite est en fait une limite «haute» qui ne peut être atteinte. Pour classer les éoliennes par rapport à cette limite de Betz, on utilise couramment le coefficient de puissance défini par :

$$C_p = \frac{P_{\text{éolienne}}}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} \quad (\text{I.8})$$

Et la vitesse spécifique  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{\Omega R}{V_1} \quad (\text{I.9})$$

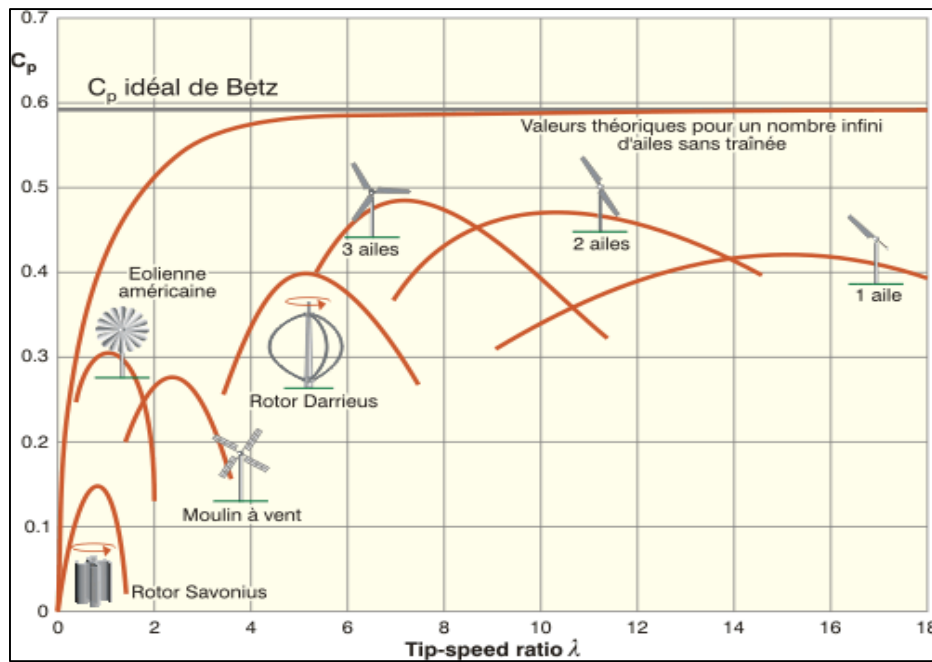


Figure (I.12) : Représentation des performances des différents types d'éolienne

## I.9. Génératrice et transmission

La chaîne de transmission est relativement standard. Dans le cas des éoliennes à axe horizontal on trouve d'un côté les pales qui sont soumises à une certaine force et qui ont une certaine vitesse de rotation. Ces pales sont solidarisées à un moyeu, ce moyeu est lui-même connecté à l'arbre de transmission. À l'autre extrémité, on trouve la génératrice. Il s'agit de machines tournantes composées d'un stator et d'un rotor qui est l'élément qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. De manière générale on trouve une boîte de vitesse (gear box) entre l'arbre et la génératrice.

### I.9.1. Génératrice synchrone

Ce terme regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation.

### I.9.2. Génératrice asynchrone

Les machines asynchrones fonctionnent autour de leur vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau, elle est souvent associée aux éoliennes de forte puissance. Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme. La différence entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement. Le couple et la puissance fournie sont proportionnels au glissement.

### **I.9.3. Machine asynchrone (MAS) à cage**

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator. Une topologie consiste à relier directement la M.A.S à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau.

### **I.9.4. Machine asynchrone à double alimentation (M.A.D.A)**

La MADA est utilisée dans plusieurs applications (Elbia, 2009)., notamment dans les éoliennes et les systèmes de production d'énergie renouvelable, où elle permet de maximiser l'efficacité énergétique. Elle est également utilisée dans les applications industrielles nécessitant un contrôle précis de la vitesse, telles que les systèmes de transport et les machines-outils. Le principe de fonctionnement de la MADA est basé sur la combinaison de deux champs magnétiques tournants, l'un généré par le circuit principal et l'autre par le circuit secondaire. Cela permet à la machine de fonctionner à des vitesses variables, tout en maintenant une puissance constante.

### **I.10. Le rendement**

Le rendement d'une éolienne est généralement exprimé en pourcentage et représente la quantité d'énergie électrique réellement produite par rapport à la quantité d'énergie cinétique du vent disponible. Il est influencé par plusieurs facteurs, tels que la vitesse du vent, la conception de l'éolienne et les conditions environnementales on prend par exemple la ferme éolienne de kebertan (Adrar) un an après sa mise en service officielle en juillet 2014 d'une puissance totale installée de 10.2MW la ferme pilote de Kaberten affichait, en octobre 2015, les performances suivantes :

- Production énergétique : 19 GWh
- Durée de fonctionnement : 1900 heures



### **I.11.Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté une brève description des systèmes éoliens, de leur composition et de leurs principes de fonctionnement. Ensuite, nous avons rappelé les notions élémentaires nécessaires pour comprendre la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Nous avons également abordé les machines électriques, leurs applications et leur adaptation à un système éolien.

Le deuxième chapitre sera consacré pour la présentation et la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA.

# **Chapitre II**

## **Modélisation et simulation de la chaîne éolienne**

## MODELISATION ET SIMULATION DE LA CHAÎNE ÉOLIENNE

### II.1. Introduction

Les machines asynchrones à double alimentation (Doubly Fed Induction Machines en anglais) sont des machines électriques rotatives qui se distinguent des machines asynchrones conventionnelles par leur système d'alimentation à double source. Ces machines sont utilisées dans une variété d'applications industrielles, telles que les éoliennes, les centrales hydroélectriques, les locomotives électriques, les véhicules électriques et les équipements de contrôle de processus.

Le système d'alimentation à double source de ces machines est constitué d'un circuit de stator alimenté par une source d'alimentation triphasée fixe et d'un circuit de rotor alimenté par une source d'alimentation triphasée variable. Cela permet à la machine de contrôler de manière dynamique la vitesse de rotation, la puissance et le couple de sortie, offrant ainsi une efficacité énergétique élevée et une performance améliorée par rapport aux machines asynchrones conventionnelles.

### II.2. Structure de la machine et configuration électrique

La génératrice asynchrone à double alimentation est composée d'un stator similaire à celui de la machine asynchrone à cage d'écurieuil (MAS) ou de la machine synchrone (MS) avec au moins 3 enroulements décalés de  $120^\circ$  (Elbia 2009). En revanche, son rotor à bague est totalement différent, car il ne contient ni aimants ni cage d'écurieuil. Le rotor à bague est constitué d'un enroulement à courant triphasé dont les extrémités sont connectées à une boîte à bornes via des bagues collectrices et des balais (figure II.1) facilitant ainsi leur accès depuis l'extérieur. Cette configuration permet d'alimenter séparément à la fois le stator et l'enroulement du rotor (double bobinage).

Cependant, une partie de l'énergie produite par le rotor appelée puissance de glissement, reste inutilisée et perdue. Dans le cas de la génératrice asynchrone à double alimentation, cette puissance est transférée dans le réseau sous forme de puissance "utilisable". Ce transfert est réalisé grâce à un rotor alimenté par des convertisseurs. Ces convertisseurs permettent de régler la fréquence et la tension du courant circulant dans l'enroulement du rotor. En ajustant la puissance échangée entre le rotor et le réseau, il est possible de contrôler la vitesse de rotation du rotor. Ce contrôle précis permet d'optimiser la production d'énergie en fonction des variations de la demande ou des conditions du réseau.

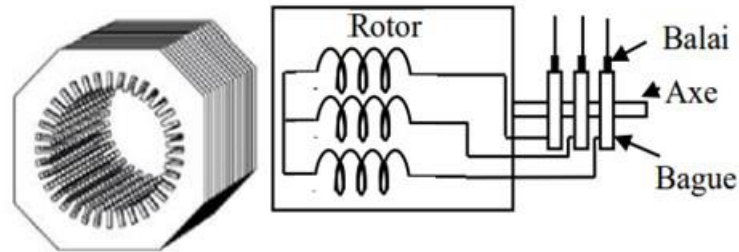


Figure (II.1): Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

## II.3. Paramètre de la machine

### II.3.1. Vitesse de synchronisme

La vitesse de synchronisme d'une machine asynchrone est déterminée par la fréquence de l'alimentation électrique et le nombre de paires de pôles du stator. La vitesse de synchronisme est donnée par la formule suivante :

$$N_s = 60 * f / P \quad (II.1)$$

- ☞  $N_s$  : vitesse de synchronisme en tr/min.
- ☞  $f$  : fréquence en Hz.
- ☞  $P$  : nombre de paires de pôle.

### II.3.2. Glissement

Le glissement est une caractéristique importante de la machine asynchrone à double alimentation. Il représente la différence de vitesse entre le champ magnétique tournant produit par le stator et la vitesse de rotation du rotor de la machine. Le glissement est causé par l'induction électromagnétique dans le rotor de la machine, qui crée un courant de Foucault qui s'oppose au champ magnétique tournant du stator.

Le glissement est exprimé en pourcentage et est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$g = (N_s - N_r) / N_s * 100\% \quad (II.2)$$

- ☞  $g$  : est le glissement en pourcentage.
- ☞  $N_s$  est la vitesse de synchronisme en tr/min.
- ☞  $N_r$  est la vitesse de rotation du rotor en tr/min.

Le contrôle de la vitesse en mode génératrice peut également être réalisé en utilisant le glissement. En modifiant la fréquence de l'alimentation du rotor, il est possible de modifier le

glissement et donc la vitesse de rotation du rotor. Ce contrôle de la vitesse peut être utilisé dans des applications telles que les centrales hydroélectriques ou les générateurs éoliens.

## II.4. Les modes de fonctionnement

Le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dépend du mode de fonctionnement utilisé, moteur ou génératrice, ainsi que du type de fonctionnement, hyposynchrone ou hypersynchrone.

### II.4.1. Mode moteur hyposynchrone

Pour le moteur hyposynchrone, la vitesse de rotation du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme. Dans ce mode de fonctionnement, la machine asynchrone à double alimentation est utilisée pour fournir un couple de démarrage élevé avec une faible consommation d'énergie.

- $\omega_r < \omega_s \Rightarrow 0 < g < 1$  (II.3)
- ☞  $\omega_r$ : la vitesse de rotation du rotor en rad/s
- ☞  $\omega_s$ : la vitesse de synchronisme en rad/s
- ☞  $g$ : le glissement en pourcentage.

### II.4.2. Mode moteur hypersynchrone

Pour le moteur hypersynchrone, la vitesse de rotation du rotor est supérieure à la vitesse de synchronisme. Dans ce mode de fonctionnement, la machine asynchrone à double alimentation est utilisée pour fournir une puissance de sortie élevée avec une efficacité accrue. Ce mode de fonctionnement est généralement utilisé dans les applications de traction, comme les trains à grande vitesse.

$$\omega_r > \omega_s \Rightarrow g < 0 \quad (II.4)$$

### II.4.3. Génératrice hyposynchrone et hypersynchrone

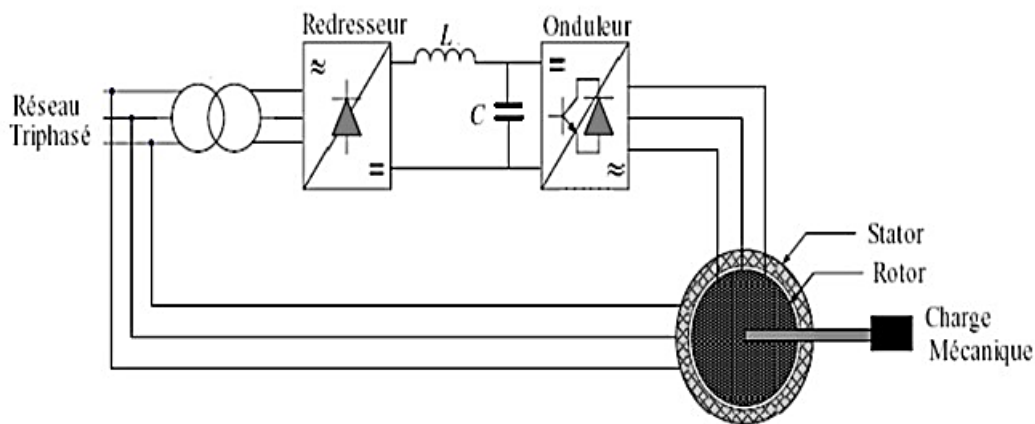
Pour le mode de fonctionnement de génératrice hyposynchrone, la machine asynchrone à double alimentation est utilisée pour générer de l'énergie électrique avec une faible vitesse de rotation. Alors que, pour le mode de fonctionnement de génératrice hypersynchrone, elle est utilisée pour générer de l'énergie électrique à haute vitesse de rotation. Ce mode de fonctionnement est généralement destiné pour les applications de production d'énergie éolienne.

## II.5. La modélisation de la chaîne éolienne

La chaîne éolienne est composée de différents éléments interconnectés, qui convertissent l'énergie du vent en énergie électrique utilisable. La modélisation de la chaîne éolienne permet de simuler son comportement et d'optimiser son fonctionnement.

### II.5.1 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La modélisation de la GADA (Doubly-Fed Induction generator ou DFIG en anglais) est une étape importante pour comprendre son comportement électrique et mécanique.



**Figure (II.2) :** Schéma général d'un système utilisant une GADA alimenté par deux convertisseurs statiques

#### II.5.1.1 Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses qui permettent de modéliser un système sont énumérer comme suite (Brahmi, Chanoun 2012).

- L'entrefer est considéré constant.
- L'effet des encoches est négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

La figure (II.3) illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à une paire de pôle  $P= 1$ . Souvent la machine sera construite avec plusieurs paires

de pôles en reliant les enroulements en parallèle et les bobines seront décalées de 120. Dans ce cas la machine donne un couple plus grand et une vitesse de rotation réduite.

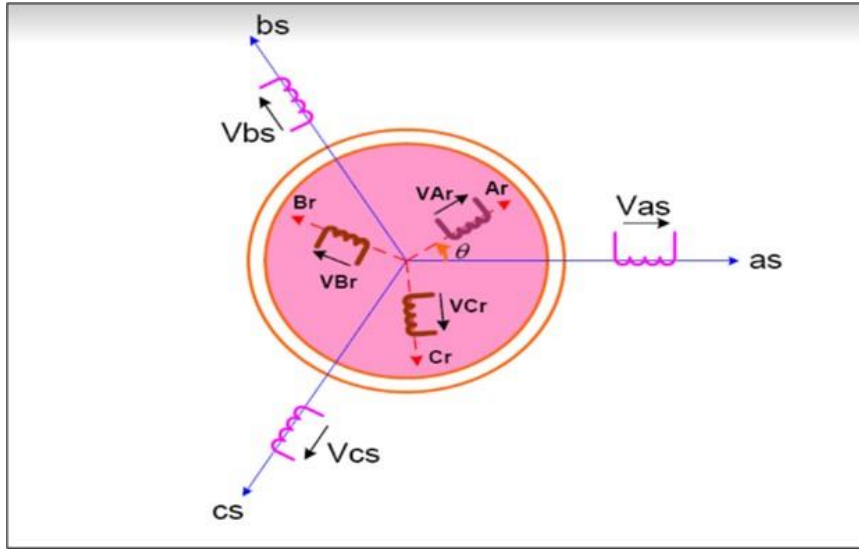


Figure (II.3): Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

$a_s, b_s, c_s$  : Phase Stator

$A_r, B_r, C_r$  : Phase Rotor

### II.5.1.2 Equation électrique de la machine

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère triphasé s'écrivent (El Aimani 2004) :

$$\begin{cases} [V_s] = R_s [I_s] + \frac{d\phi_s}{dt} \\ [V_r] = R_r [I_r] + \frac{d\phi_r}{dt} \end{cases} \quad (II.5)$$

Avec :

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \quad (II.6)$$

Et

$$[R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \quad (II.7)$$

Avec respectivement :

$R_s$  et  $R_r$ : Les résistances statorique et rotorique par phase.

$V_s, V_r$  : Les tensions statoriques et rotoriques de la machine.

$L_s$  ,  $L_r$  : Inductances propres statorique et rotorique.

$\phi_s$  ,  $\phi_r$  : Les flux statoriques et rotoriques de la machine.

$M_s$  ,  $M_r$  : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques.

### II.5.1.3 Equation magnétique :

Il est possible d'exprimer les flux en fonction des courants et des différentes inductances propres et mutuelles de la machine par

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M][I_s] \end{cases} \quad (II.8)$$

Avec :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad (II.9)$$

Sous forme matricielle :

$$[L_s] = \begin{pmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{pmatrix} \quad (II.10)$$

$$[L_r] = \begin{pmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{pmatrix} \quad (II.11)$$

Avec respectivement :

$L_s$  et  $L_r$  : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

$l_s$  et  $l_r$  : les inductances propres statoriques et rotoriques de la machine.

$M_s$  et  $M_r$  : les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la machine.

$M$  : l'inductance magnétisante.

$M_{sr}$  : la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

$\Theta$  : L'angle de rotation du rotor par rapport au stator



La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{pmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \\ M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \\ M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) & M_{sr} \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (II.12)$$

#### II.5.1.4 Equation mécanique

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = P[I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M][I_s]) \quad (II.13)$$

Donc l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f_r \omega \quad (II.14)$$

J : moment d'inertie du rotor

$\omega$  : vitesse angulaire (mécanique) du rotor.

$f_r$  : Coefficient de frottement visqueux.

$C_{em}$  : couple électromagnétique délivré par le moteur

$C_r$  : couple résistant, ou de charge.

#### II.5.2 Transformation de PARK

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système (figure.II.4).

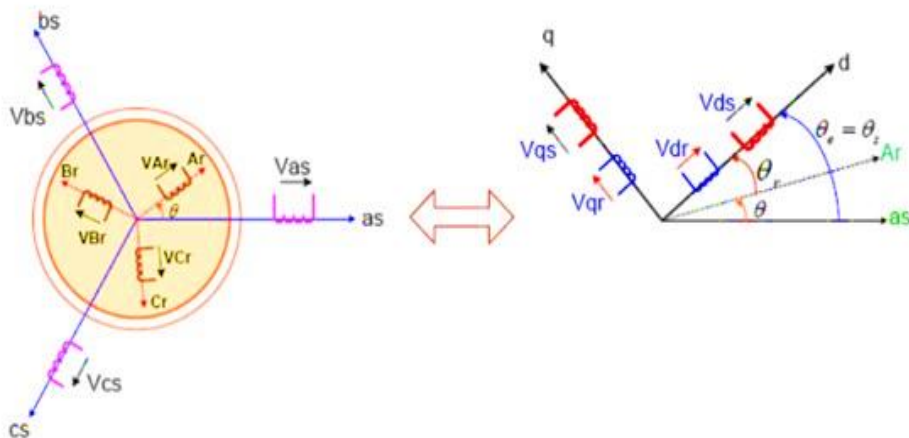


Figure (II.4) : Passage du triphasé au biphasé.

On utilise la transformation de Park qui conserve la puissance instantanée.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

$$\text{Soit : } [V_{0dq}] = [P][V_{abc}] \quad (II.16)$$

$$[i_{0dq}] = [P][i_{abc}] \quad (II.17)$$

$$[\Phi_{0dq}] = [P][\Phi_{abc}] \quad (II.18)$$

De même pour la transformation inverse :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

$$\text{Ou : } [V_{abc}] = [P]^{-1}[V_{0dq}] \quad (II.20)$$

Après avoir effectué les transformations précédentes, le modèle de la machine dans le référentiel de Park est le suivant :

### II.5.2.1 Equation électrique

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_s - \omega) \\ (\omega_s - \omega) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

$$\text{Avec : } \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

### II.5.2.2 Equation magnétique

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

Avec :  $L_s = l_s - M$  : Inductance cyclique propre du stator et du rotor respectivement.

$$L_r = l_r - M$$

$$M = \frac{3}{2} M_{sr} : \text{Inductance cyclique mutuelle stator-rotor.}$$

### II.5.2.3 Equation mécanique

Le couple électromécanique représenté dans l'équation (II.13) :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad (II.25)$$

L'équation de la vitesse mécanique est représentée par l'équation (II.14) :

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f \omega \quad (II.26)$$

### II.5.2.4 Equation de courant :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \Phi_{ds} - \frac{K^2}{\sigma M} \Phi_{dr} \\ I_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \Phi_{qs} - \frac{K^2}{\sigma M} \Phi_{qr} \end{cases} \quad (II.27)$$

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{\sigma M} \Phi_{dr} - \frac{K^2}{\sigma M} \Phi_{ds} \\ I_{qr} = \frac{1}{\sigma M} \Phi_{qr} - \frac{K^2}{\sigma M} \Phi_{qs} \end{cases} \quad (II.28)$$

### II.5.2.5 Equations électriques dans le repère de Park

$$\text{Stator} \quad \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} - \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (II.29)$$

$$\text{Rotor} \quad \begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II.30)$$

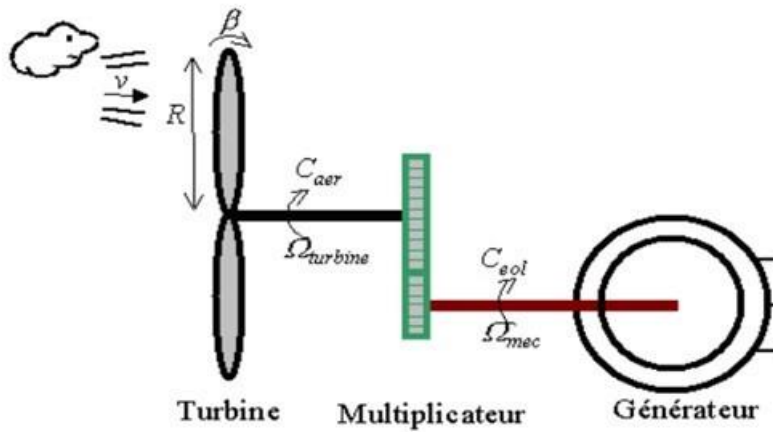
**II.5.2.6 Equation magnétique :**

$$\text{Stator} \begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (II.31)$$

$$\text{Rotor} \begin{cases} \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (II.32)$$

**II.6. La modélisation de la turbine éolienne**

La turbine éolienne est constituée comporte trois pales de longueur R fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$ , qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure.II.5).



**Figure (II.5):** Schéma d'une turbine éolienne.

**II.6.1. Modélisation de multiplicateur**

Multiplicateur il augmente ou diminue la vitesse et le couple en fonction de l'utilisation, et modélisée mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{1}{G} C_{aer} \quad (II.33)$$

$$\Omega_{Turbine} = \frac{1}{G} \Omega_{mec} \quad (II.34)$$

G : Gain du multiplicateur

**II.6.2. Modélisation de l'arbre de la machine**

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et générateur est donnée par :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_r}{dt} = C_g - C_m - (f_m - f_t)\Omega \quad (II.35)$$

$J_t$ , et  $J_m$  : Sont les inerties de la turbine et de la machine respectivement

$f_m$  : Le coefficient de frottement de la machine

$f_t$  : Le coefficient de frottement des pales

$C_g$  : Le couple statique fournie par l'éolienne

## II.7. Etape de simulation

Après avoir modélisé mathématiquement le sous- système, nous avons lancé la simulation sous matlab/simulink dont les données de simulation sont consignées dans l'annexe I.

La figure ci-dessus représente le schéma global de la chaîne de production de l'énergie éolienne.

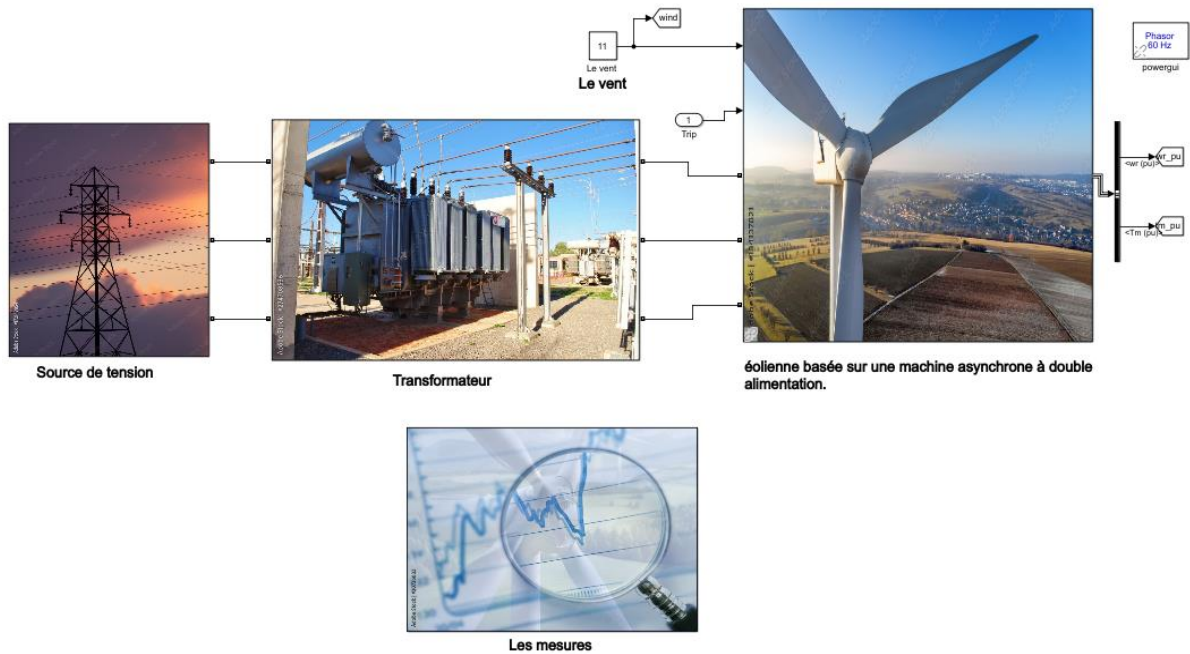
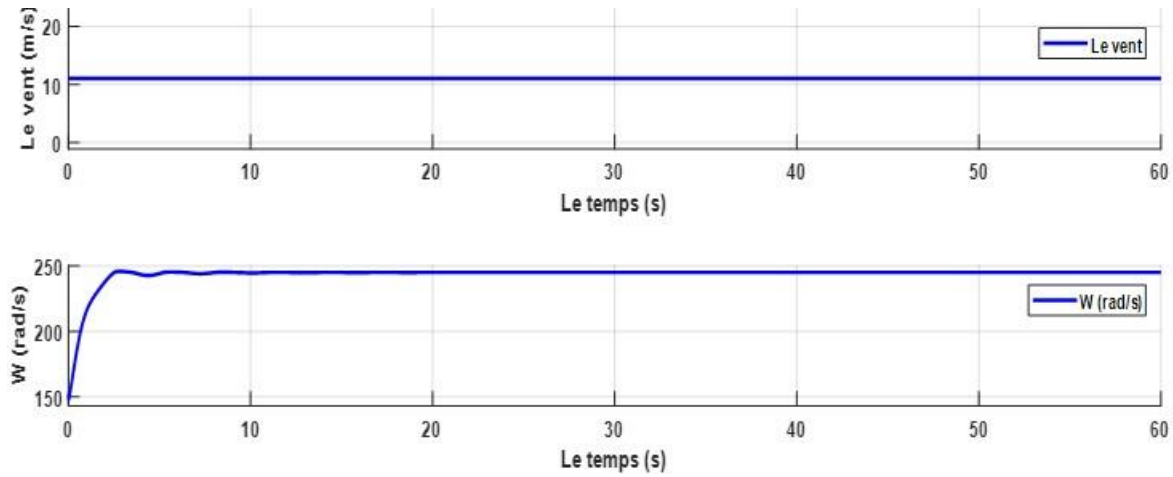


Figure (II.6) : Schéma de principe de simulation avec vitesse fixe

## II.8. Résultats et analyses

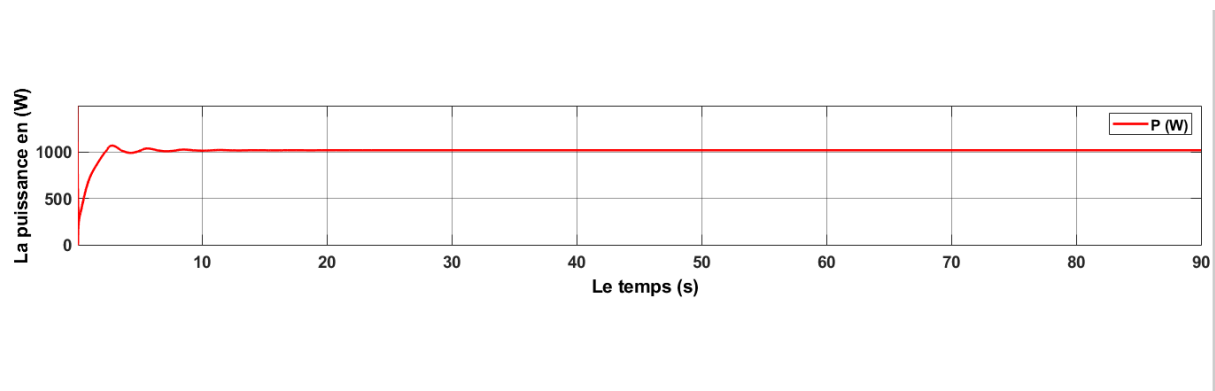
### II.8.1. Fonctionnement avec vitesse de vent fixe

Les figures (II.7-II.8-II.9) présentent les résultats de simulations obtenus pour le système en fonctionnement normale pour une vitesse de vent constant (11m/s), d'après la figure (II.7), on remarque que la vitesse de rotation de la génératrice augmente à partir de sa valeur initiale jusqu'à le régime permanent.

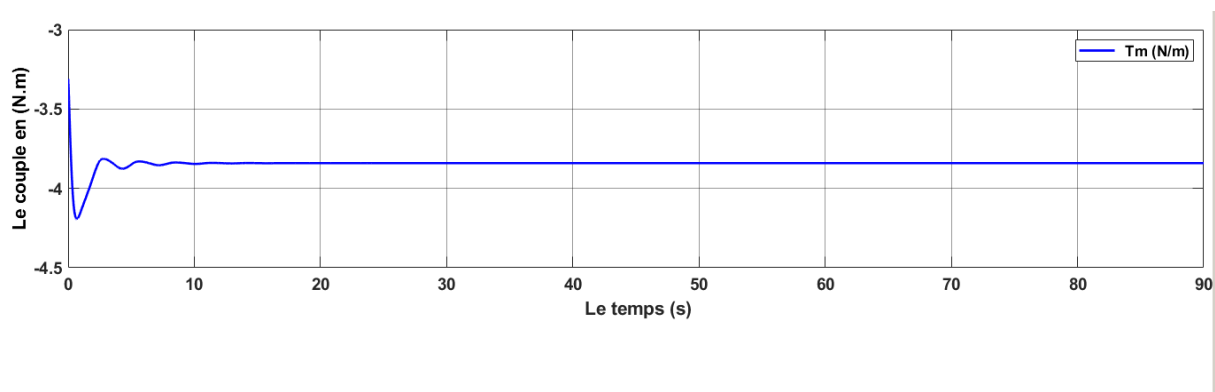


**Figure (II.7) :** la vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor en fonction du temps

Les figures (II.8) et (II.9) représente la puissance et le couple mécanique en fonction de temps on consterne que les deux graphes évaluent le même maniéré Que la vitesse de l'arbre de transmission ils traverse par un régime transitoire jusqu'à se stabilise à un régime permanent.



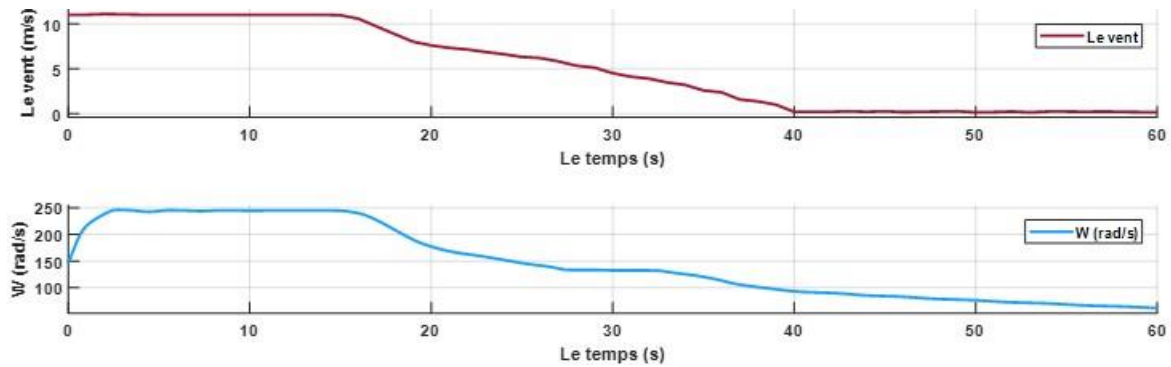
**Figure (II.8) :** la puissance mécanique de la turbine en fonction de temps



**Figure (II.9) :** le couple mécanique de la turbine en fonction du temps

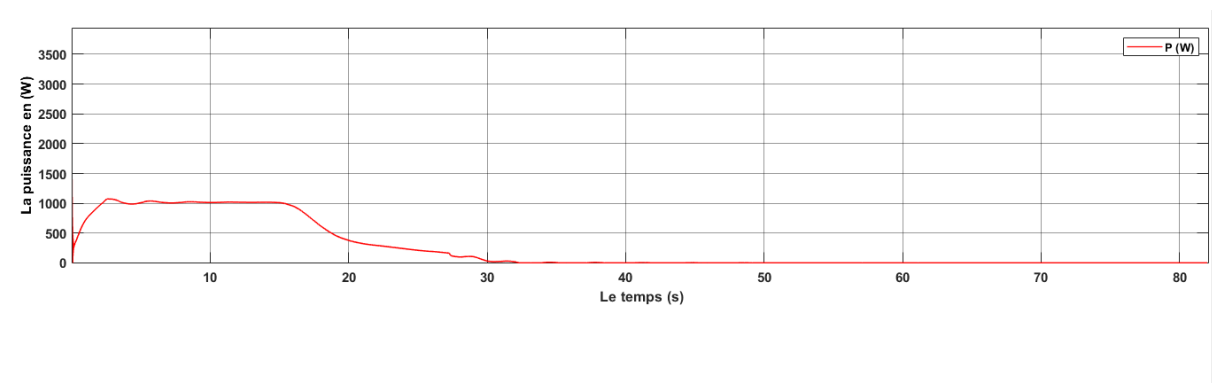
### II.8.2. Fonctionnement avec diminution de vitesse de vent

Les figures (II.10-II.11-II.12) présentent les résultats de simulations obtenus pour le système quand le vent dégrade sa vitesse, d'après la figure (II.10), on remarque que la vitesse de rotation de la génératrice augmente à partir de sa valeur initial (régime transitoire) jusqu'à atteindre son régime permanent, puis se dégrade en suivant la diminution de vitesse de vent jusqu'à qu'elle s'annule.



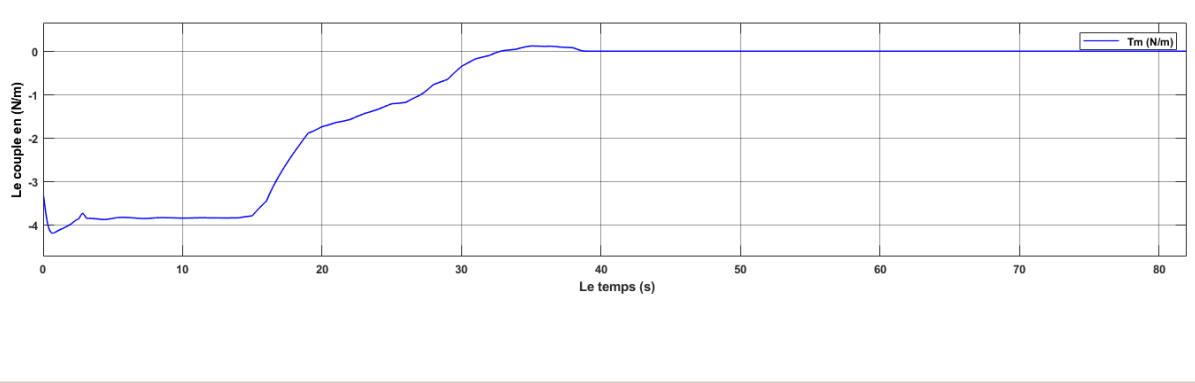
**Figure (II.10) :** la vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor en fonction du temps.

La figure (II.11) représente la puissance mécanique en fonction de temps on voit d'après le graphe qu'elle augmente pour atteindre une valeur nominale puis diminue jusqu'à son annulation suite à la diminution de vitesse de vent.



**Figure (II.11) :** la puissance mécanique de la turbine en fonction de temps

La figure (II.12) représente le couple mécanique en fonction de temps on voit que le couple est constant par présence de vent et s'annule par suite de diminution de vitesse de vent



**Figure (II.12) :** le couple mécanique de la turbine en fonction du temps

## II.9 Conclusion

En conclusion, il est clair que la modélisation et la simulation du système éolien nous ont permis de comprendre la réaction du système face à certaines conditions de fonctionnement. En effet, on remarque que la vitesse du vent influe directement sur la puissance de sortie.

Pour améliorer le rendement, on a pensé optimiser ce système en introduisant un volant d'inertie qui sera situé au niveau de la nacelle.

L'introduction d'un volant d'inertie présente un potentiel considérable pour augmenter l'efficacité globale de notre système éolien. Cette technologie permet de stocker l'énergie cinétique sous forme de rotation à grande vitesse, ce qui permet de compenser les fluctuations de vitesse du vent. En ajoutant une volante d'inertie, nous pouvons atténuer les variations de puissance et améliorer la stabilité du système.



# **Chapitre III**

## **Dimensionnement du système de stockage d'énergie par le volant d'inertie**

## DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE STOCKAGE D'ENERGIE PAR LE VOLANT D'INERTIE

### III.1 Introduction

Un volant d'inertie est un système de stockage d'énergie sous forme d'énergie cinétique de rotation. Il est constitué d'une masse, le plus souvent un cylindre creux ou plein (mais d'autres formes sont possibles). Cette masse tourne autour d'un axe, est généralement fixe et est enfermée dans un boîtier de protection. Il est relié à un moteur/générateur qui convertit l'énergie cinétique en énergie électrique et vice versa.

Ce mécanisme permet de stocker l'énergie :

Pendant le processus d'empilement, le moteur convertit l'énergie électrique entrante en énergie cinétique, augmentant ainsi la vitesse de rotation de la masse ;

Pendant la phase stationnaire, c'est-à-dire la conservation de l'énergie, la vitesse de rotation de la masse doit rester constante. L'apport d'énergie est minime et ne compense que les pertes liées au frottement.

Lors de la phase de déstockage ou de récupération, le générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, freinant ainsi la masse.

Le système est très efficace (pertes inférieures à 5%) et peut générer de l'électricité en quelques millisecondes, mais la puissance est limitée. Il est utile pour atténuer les courtes périodes de pointe de consommation d'électricité et peut être installé aussi près que possible de l'endroit où l'électricité est consommée.

### III.2 Historique

Ils constituent une forme très ancienne et très répandue de stockage de l'énergie. Ils ont été utilisés sur les tours de potiers depuis l'antiquité, et chaque moteur thermique en comporte au moins un :



Figure (III.1) : Volant d'inertie de moteur automobile

Ils ont pour objet de stocker l'énergie mécanique sous forme d'énergie cinétique en rotation quand ils accélèrent, et de restituer cette énergie quand ils ralentissent. Dans la plupart des applications, et notamment pour les moteurs thermiques, leur objet est de régulariser cette rotation malgré les variations périodiques ou aléatoires du couple moteur et/ou du couple résistant. Les transferts d'énergie sont très fréquents et de faible amplitude : ainsi, pour un moteur 4 cylindres 4 temps, soit 2 explosions par tour, tournant à 3 000 t/min, la période de charge / décharge du volant est de 10 millisecondes. Le « stockage » est donc très bref.

Il est aussi utilisé à grande échelle dans les jouets, pour deux applications principales : les petites voitures appelées à tort « à friction », et les toupies. Ces dernières existent aussi sous une forme plus élaborée, dite gyroscope, aux propriétés déconcertantes, quoique parfaitement modélisées par la Mécanique rationnelle, parfois utiles (guidage inertiel), parfois indésirables (couple de précession, dite « effet gyroscope ») :



Figure (III.2) : Volant d'inertie de moteur automobile

### III.3 Fonctionnement

Le stockage d'énergie augmente avec la masse et est proportionnel au carré de la vitesse, et ceci est obtenu par l'homogénéité de deux types de volants, dont l'un joue sur la masse et le second sur la vitesse.

Les volants d'inertie basse vitesse : ce sont les systèmes les plus matures, ils mettent en jeu des masses importantes dans des matériaux lourds type acier. Leur vitesse de rotation est inférieure à 10 000 tr/min (tours par minute) ;

Les volants d'inertie haute vitesse : ils utilisent des matériaux plus légers type fibre de carbone ou de verre. Ils ont des vitesses de rotation pouvant aller jusqu'à 50 000 tr/min.

Au début du stockage, la machine fonctionne comme un moteur, de sorte que l'énergie électrique y pénètre par le réseau et la convertit en énergie cinétique en accélérant le volant à sa vitesse maximale.

Et lors du stockage, la machine n'exerce aucun couple en faisant tourner le volant à vitesse constante.

Dans ce dernier cas, la machine agit comme un générateur qui ralentit le volant et convertit son énergie cinétique en énergie électrique qui retourne au réseau. Et la puissance résultante n'est pas nécessairement égale à la puissance d'entrée, en fonction de la masse du volant.

### III.4 Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expédition dans un délai rapide</li> <li>• Il a un rendement élevé en récupérant 80% de l'énergie absorbée</li> <li>• Rapidité en début de travail puis retour d'énergie</li> <li>• Travail de très longue durée et respectueux de l'environnement</li> <li>• La simplicité de son travail, car il convertit l'énergie électrique en énergie mécanique (cinétique) et la restitue également à une énergie supérieure à la première à une valeur supérieure.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La possibilité d'échec est dangereuse pour la situation.</li> <li>• Ils nécessitent des matériaux capables de supporter le moment cinétique que le volant lui-même a.</li> </ul>

### III.5 Théorie des volants d'inertie

#### III.5.1 Dimension du système de stockage d'énergie par le volant d'inertie

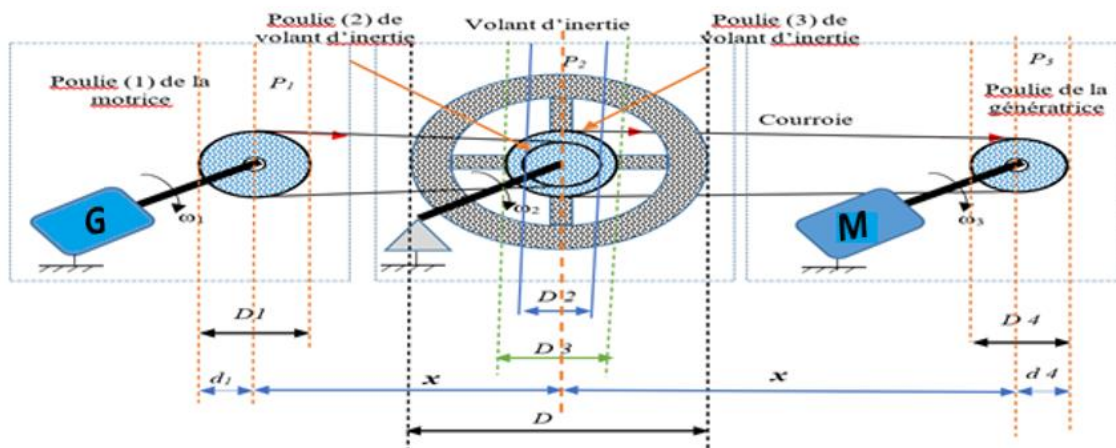


Figure (III.3) : dimension géométrique du système de stockage d'énergie du volant d'inertie.

### III.5.2 Caractéristiques de la génératrice

Désignations	Valeurs
Puissance nominale (P)	1.1 Kw
Vitesse de rotation (N1)	2339.6 tr/min
Vitesse angulaire ( $\omega$ )	245 rad/s
Couple nominale ( $C_n$ )	4.48 N.m
Moment d'inertie ( $J_m$ )	0.00078 Kg $m^2$
Tension	460 V

### III.5.3 Caractéristiques du moteur à courant continu

Désignations	Valeurs
Puissance nominale (P)	1.23 Kw
Vitesse de rotation (N4)	2368.23 tr/min
Vitesse angulaire ( $\omega$ )	248 rad/s
Couple nominale ( $C_n$ )	4.95 N.m
Moment d'inertie ( $J_m$ )	0.00262 Kg $m^2$
Tension d'alimentation	190 V
Tension d'excitation	100 V

- a) Dimensionnements géométriques des poulies du système de stockage d'énergie du volant d'inertie

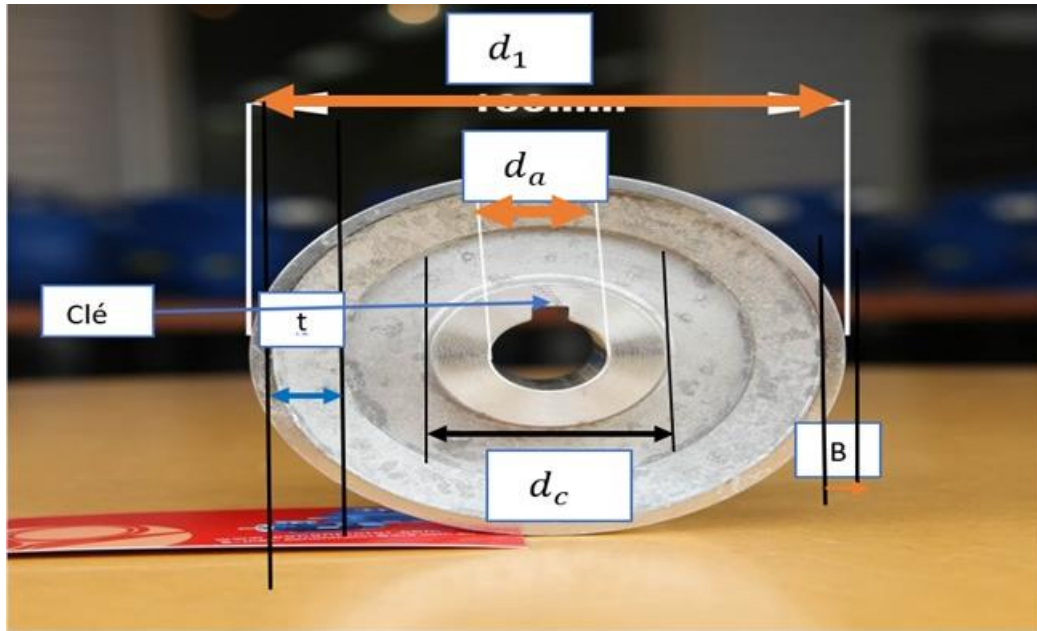


Figure (III.4) : dimension géométrique de poulie.

**Remarque :**

$d_1$  : Diamètre de poulie.

$d_a$  : Diamètre d'arbre de poulie.

$d_c$  : Diamètre de center de poulie.

T : épaisseur de poulie.

B : largeur de poulie.

**Tableau III.1** : Caractéristiques géométriques des poulies du système de stockage de volant d'inertie

	Poulie 1	Poulie 2	Poulie 3	Poulie 4
Diamètre ( $D_n$ )	180 mm	160 mm	160 mm	180 mm
Largeur (B)	22 mm	22 mm	22 mm	22 mm
Épaisseur (t)	4 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Diamètre d'arbo ( $d_a$ )	20mm	78mm	78 mm	20mm
Diamètre de centre ( $d_c$ )	54mm	142 mm	142 mm	54 mm
Largeur de clè (W)	6 mm	22 mm	22mm	6 mm
Épaisseur de clè (T)	6 mm	14 mm	14 mm	6 mm
Mass (m)	0.388	0.345	0.345	0.388

✓ **Détails mathématiques de la dimension des poulies :**

❖ **Poulie 1 :**

☞ **Calcule largeur et épaisseur de poulie :**

On a :

$$D_1 = 180 \text{ mm}$$

$D_1$  : Diamètre de poulie (1) de moteur

$$B = 1.25b$$

B : largeur de poulie

b : largeur de courroie

$$b = 17 \text{ mm}$$

$$B = 17 \times 1.25$$

$$B = 21.25 \text{ mm}$$

Selon le diamètre standard des poulies en mm pour les courroies plates et trapézoïdales :

$$B = 22 \text{ mm}$$

$$t = \frac{D_1}{200} + 3 \text{ mm}$$

t : épaisseur de poulie

$$t = \frac{180}{200} + 3 = 4$$

$$t = 4 \text{ mm}$$

☞ **Dimensions des bras de poulie :**

Les poulies de moins de 200 mm de diamètre sont réalisées avec des disques pleins au lieu de bras. L'épaisseur de l'âme pleine est prise égale à l'épaisseur de jante mesurée au centre de la face de poulie.

☞ **Calcule le diamètre de l'arbre de poulie :**

$$T = \frac{\pi}{16} \times \tau \times d_a^3 \tag{III.1}$$

$$\tau = 14 \text{ MPa} \tag{III.2}$$

$d_a$  : diamètre de l'arbre de poulie.

T : le couple maximum de transmission.

$\tau$  : contrainte de flexion

$$T = 2 \times C_m \quad (III.3)$$

$$C_m = \frac{P_{moteur}}{\omega_{moteur}} \quad (III.4)$$

$C_m$  : Le couple nominal de la génératrice.

$$C_m = \frac{1.1 \times 10^3}{245} = 4.48 \text{ N.m}$$

$$T = 2 \times 4.48 = 8.97 \text{ N.m}$$

$$8.97 \times 10^3 = \frac{\pi}{16} \times 14 \times d_a^3$$

$d_a = 13.90 \text{ mm}$ , selon les poulies de marché, on prend :

$$d_a = 20 \text{ mm}$$

☞ **Dimension de center de poulie :**

Calcule le diamètre ( $d_c$ ) de center de poulie (1)

$$d_c = 1.5 d_1 + 25 \text{ mm} \quad (III.5)$$

$d_a$  : Diamètre de l'arbre de poulie

$$d_c = 1.5 \times 20 + 25$$

$$d_c = 54 \text{ mm}$$

☞ **Dimension de clé de poulie :**

Selon la dimension standard de la clé pour le diamètre de l'arbre ( $d_a$ ) 20mm.

Largeur de clé  $W = 6 \text{ mm}$ .

Epaisseur de clé  $T = 6 \text{ mm}$ .

☞ **Calcule la masse de poulie :**

$m = \text{surface} \times \text{longueur} \times \text{densité}$



$$m = B \times t \times \pi \times D_1 \times \rho \quad (III.6)$$

$$m = 0.022 \times 0.004 \times \pi \times 0.180 \times 7800$$

$$m = 0.388 \text{ Kg}$$

☞ **Calcule l'énergie cinétique de poulie :**

$$E_c = \frac{1}{2} \times J \times \omega_{moteur}^2 \quad (III.7)$$

$$J = \frac{1}{2} \times m \times \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \quad (III.8)$$

$E_c$  : Énergie cinétique de poulie 1

J : moment d'inertie de poulie 1

$$J = \frac{1}{2} \times 0.388 \times 0.09^2 = 0.0015714 \text{ Kg.m}^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} \times 0.0015714 \times 245^2 = 47.16 \text{ j}$$

❖ **Poulie 2 :**

☞ **Calcule largeur et épaisseur de poulie :**

On a :

$$D_2 = 160 \text{ mm}$$

$D_2$  : Diamètre de poulie (2) de volant d'inertie

$$B = 1.25b$$

B : largeur de poulie

b : largeur de courroie

$$b = 17 \text{ mm}$$

$$B = 17 \times 1.25$$

$$B = 21.25 \text{ mm}$$

Selon le diamètre standard des poulies en mm pour les courroies plates et trapézoïdales :

$$B = 22 \text{ mm}$$

$$t = \frac{D_2}{200} + 3 \text{ mm} \quad (III.9)$$

t : l'épaisseur de poulie

$$t = \frac{160}{200} + 3 = 3.8$$

$$t = 4 \text{ mm}$$

☞ **Dimensions des bras de poulie :**

Les poulies de moins de 200 mm de diamètre sont réalisées avec des disques pleins au lieu de bras. L'épaisseur de l'âme pleine est prise égale à l'épaisseur de jante mesurée au centre de la face de poulie.

☞ **Calcule le diamètre de l'arbre de poulie :**

$$T = \frac{\pi}{16} \times \tau \times d_a^3 \quad (III.10)$$

$$\tau = 14 \text{ MPa} \quad (III.11)$$

$d_a$  : Diamètre de l'arbre de poulie.

T : le couple maximum de transmission.

$\tau$  : Contrainte de flexion.

$$T = 2 \times C_v \quad (III.12)$$

$$C_v = \frac{P_{volant}}{\omega_{volant}} \quad (III.13)$$

$C_v$  : le couple nominal de volant d'inertie.

$$C_v = \frac{1.1 \times 10^3}{275.63} = 4 \text{ N.m}$$

$$T = 2 \times 4 = 8 \text{ N.m}$$

$$8 \times 10^3 = \frac{\pi}{16} \times 14 \times d_a^3$$

$$d_a = 14.27 \text{ mm}$$

Selon le diamètre de l'arbre de volant d'inertie, on prend le diamètre de l'arbre de volant d'inertie :

$$d_a = 78 \text{ mm}$$

☞ **Dimension de center de poulie :**

Calcule le diamètre ( $d_c$ ) de center de poulie :

$$d_c = 1.5 d_a + 25 \text{ mm} \quad (III.14)$$

$d_c$  : Diamètre de l'arbre de poulie

$$d_c = 1.5 \times 78 + 25$$

$$d_c = 142 \text{ mm}$$

☞ **Dimension de clè de poulie :**

Selon la dimension standard de la clé pour le diamètre de l'arbre 80 mm.

Largeur de clè  $W = 22 \text{ mm}$ .

Epaisseur de clè  $T = 14 \text{ mm}$ .

☞ **Calcule la masse de poulie :**

$m = \text{surface} \times \text{longueur} \times \text{densité}$

$$m = B \times t \times \pi \times D_2 \times \rho \quad (III.15)$$

$$m = 0.022 \times 0.004 \times \pi \times 0.160 \times 7800$$

$$m = 0.345 \text{ Kg}$$

☞ **Calcule l'énergie cinétique de poulie :**

$$E_c = \frac{1}{2} \times J \times \omega_{volant}^2 \quad (III.16)$$

$E_c$  : Énergie cinétique de poulie 2

$J$  : moment d'inertie de poulie 2

$$J = \frac{1}{2} \times m \times \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 \quad (III.17)$$

$$J = \frac{1}{2} \times 0.345 \times 0.08^2 = 0.001104 \text{ Kg.m}^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} \times 0.001104 \times 247.63^2 = 41.93j$$

**Remarque :**

Le dimensionnement de poulie 3 est même le dimensionnement de poulie 2.

❖ **Poulie 4**

☞ **Calcule largeur et épaisseur de poulie :**

On a :

$$D_4 = 180 \text{ mm}$$

$D_4$  : Diamètre de poulie (2) de volant d'inertie

$$B = 1.25b$$

B : largeur de poulie

b : largeur de courroie

$$b = 17 \text{ mm}$$

$$B = 17 \times 1.25$$

$$B = 21.25 \text{ mm}$$

Selon le diamètre standard des poulies en mm pour les courroies plates et trapézoïdales :

$$B = 22 \text{ mm}$$

$$t = \frac{D_2}{200} + 3 \text{ mm} \tag{III.18}$$

t : l'épaisseur de poulie

$$t = \frac{180}{200} + 3 = 4$$

$$t = 4 \text{ mm}$$

☞ **Dimensions des bras de poulie :**

Les poulies de moins de 200 mm de diamètre sont réalisées avec des disques pleins au lieu de bras. L'épaisseur de l'âme pleine est prise égale à l'épaisseur de jante mesurée au centre de la face de poulie.

☞ **Calcule le diamètre de l'arbre de poulie :**

$$T = \frac{\pi}{16} \times \tau \times d_a^3 \quad (III.19)$$

$$\tau = 14 \text{ MPa} \quad (III.20)$$

$d_a$  : Diamètre de l'arbre de poulie.

T : le couple maximum de transmission.

$\tau$  : Contrainte de flexion.

$$T = 2 \times C_g \quad (III.21)$$

$$C_g = \frac{P_{dc}}{\omega_{dc}} \quad (III.22)$$

$C_g$  : Le couple nominal de Dc moteur.

$$C_g = \frac{1.23 \times 10^3}{248} = 4.95 \text{ N.m}$$

$$T = 2 \times 4.95 = 9.9 \text{ N.m}$$

$$9.9 \times 10^3 = \frac{\pi}{16} \times 14 \times d_a^3$$

$$d_a = 15.34 \text{ mm}$$

Selon les poulies de marché, on prend

$$d_a = 20 \text{ mm}$$

☞ **Dimension de center de poulie :**

Calcule le diamètre ( $d_c$ ) de center de poulie :

$$d_c = 1.5 d_a + 25 \text{ mm} \quad (III.23)$$

$d_c$  : Diamètre de l'arbre de poulie

$$d_c = 1.5 \times 20 + 25$$

$$d_c = 55 \text{ mm}$$

☞ **Dimension de clé de poulie :**

Selon la dimension standard de la clé pour le diamètre de l'arbre 20 mm.

Largeur de clé  $W = 6$  mm.

Epaisseur de clé  $T = 6$  mm.

☞ **Calcule la masse de poulie :**

$m = \text{surface} \times \text{longueur} \times \text{densité}$

$$m = B \times t \times \pi \times D_6 \times \rho \quad (III.24)$$

$$m = 0.022 \times 0.004 \times \pi \times 0.180 \times 7800$$

$$m = 0.388 \text{ Kg}$$

☞ **Calcule l'énergie cinétique de poulie :**

$$E_c = \frac{1}{2} \times J \times \omega_{dc}^2 \quad (III.25)$$

$E_c$  : Énergie cinétique de poulie 4

$J$  : moment d'inertie de poulie 4

$$J = \frac{1}{2} \times m \times \left(\frac{D_4}{2}\right)^2 \quad (III.26)$$

$$J = \frac{1}{2} \times 0.388 \times 0.09^2 = 0.0015714 \text{ Kg.m}^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} \times 0.0015714 \times 248^2 = 48.32 \text{ j}$$

**b) Dimensionnement de courroie d'entraînement :**

**Tableau III.2 :** Caractéristiques géométriques des poulies du système de stockage de volant

	Courroie 1	Courroie 2
Type	V-belt	V-belt
Longueur (L)	1 m	1 m
Largeur (B)	17 mm	17 mm
Epaisseur (t1)	11 mm	11 mm

✓ **Détaille mathématique de calcul de la longueur de courroie :**

Calcule la longueur de courroie :

$$L = \left[ \frac{\pi}{2} \left( d_1 + \frac{D_2}{2} \right) + 2x + \frac{\left( d_1 - \frac{D_2}{2} \right)^2}{4x} \right] \times 99.5\% \quad (III.27)$$

L : Longueur de courroie

	Valeur
Rayon de poulie 1 ( $\frac{D_1}{2}$ )	0.09 m
Rayon de poulie 2 ( $\frac{D_2}{2}$ )	0.08 m
Distance entre les deux centres des poulies(x )	0.37 m

$$L = \left[ \frac{\pi}{2} (0.09 + 0.08) + 2 \times 0.37 + \frac{(0.09 - 0.08)^2}{4 \times 0.37} \right] \times 99.5\%$$

L= 1 m

**c) Dimension géométrique de volant d'inertie :**

On propose un système de stockage d'énergie par une volant d'inertie pendant les temps courts d'interruption du vent dans une éolienne. La puissance de l'éolienne est évaluée 1.1 Kw, et la durée de stockage d'énergie par volant d'inertie est 60 secondes.

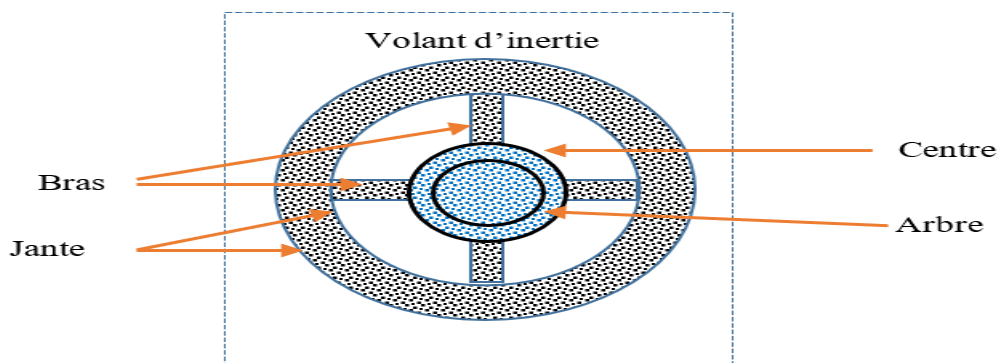


Figure ( III.5): partie de volant d'inertie.

**d) Calcule l'énergie cinétique et la masse de volant d'inertie :**

$$E_c = P_{ch} \times \Delta t. \quad (III.28)$$

$$P_{ch} = 1.1 \text{ Kw.}$$

$$\Delta t = 60 \text{ s.}$$

$$E_c = 1.1 \times 60$$

$$E_c = 66 \text{ Kj.}$$

$E$  : énergie cinétique de volant d'inertie (j).

$P_{ch}$  : La puissance de la génératrice éolienne.

$\Delta t$  : La durée de stockage.

$$E_c = \frac{1}{2} J_{volant} \times [\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2]. \quad (III.29)$$

$$\omega_{min} = \frac{\omega_{max}}{2}. \quad (III.30)$$

$$E_c = \frac{3}{8} J_{volant} \omega_{max}^2. \quad (III.31)$$

$E_c$  : Énergie cinétique de volant d'inertie (j).

$\omega_{max}$  : Vitesse angulaire maximum de volant d'inertie (rad/s).

$\omega_{min}$  : Vitesse angulaire minimum de volant d'inertie (rad/s).

$J_{volant}$  : Moment d'inertie de volant d'inertie  $\text{Kg.m}^2$ .

**Remarque :**

La vitesse minimale du volant ne peut pas être proche de zéro car la puissance nominale de volant d'inertie doit être échangée indépendamment de la vitesse et le couple nécessaire pour les basses vitesses serait alors trop élevé ( $P = T \omega_{max}$ ). La moitié de la vitesse nominale ( $\frac{\omega_{max}}{2}$ ) est choisie comme vitesse minimale pour le volant afin de ne pas sur dimensionner la machine électrique.

$$J_{volant} = \frac{8 E_c}{3 \omega_{max}^2} \quad (III.32)$$

$$\omega_{max} = \frac{2\pi N_2}{60} \quad (III.33)$$

$N_1$  : vitesse de rotation de la génératrice (tr/min)

$N_2$  : Vitesse de rotation de moteur Asynchrone triphasé (tr/min).

$$N_1 \times D_1 = N_2 \times D_2. \quad (III.34)$$

$$N_2 = \frac{N_1 \times D_1}{D_2} \quad (III.35)$$



$$N2 = \frac{2339.6 \times 180}{160} \text{ y}$$

$$N2 = 2632.05 \text{ tr/min}$$

$$\omega_{max} = \frac{2\pi \cdot 2632.05}{60}$$

$$\omega_{max} = 275.63 \text{ rad/s}$$

$$J_{volant} = \frac{8 \times 66 \times 10^3}{3 \times 275^2}$$

$$J_{volant} = 2.317 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$m = \frac{2 J_{volant}}{R^2} \tag{III.36}$$

$$R = \frac{D}{2} \tag{III.37}$$

R: Rayon de volant d'inertie (m).

m : Masse de volant d'inertie (Kg)

$$R = 0.3 \text{ m}$$

$$m = \frac{2 \times 2.317}{0.3^2}$$

$$m = 47.22 \text{ Kg}$$

**e) Calcule la dimension de la section transversale du volant (jante) :**

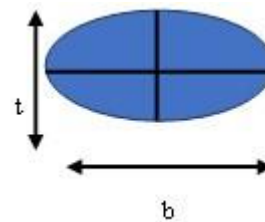
$$A = b \times t$$

$$b = 2t$$

A : la section transversale de la jante m<sup>2</sup>.

b : la largeur de la jante de volant d'inertie.

t : l'épaisseur de la jante de volant d'inertie.



**A : section transversale de la jante.**

On sache que la masse de la jante de volant d'inertie :

$$m = \text{volume} \times \text{densité} = 2\pi \times R \times \rho \times A \tag{III.38}$$

ρ : La densité du matériau d'Acier (Kg/m<sup>3</sup>).

$$\rho = 7800 \text{ Kg/ m}^3$$

$$m = 47.22 \text{ Kg.}$$

$$47.22 = 2\pi \times t^2 \times 7800 \times 0.6$$

$$t = 0.04 \text{ m}$$

$$b = 0.08 \text{ m}$$

$$A = 0.0032 \text{ m}^2$$

Calcule le diamètre et la longueur du center de volant d'inertie :

$d_c$  : le diamètre de center de volant d'inertie.

$d_A$  : le diamètre d'arbre de volant d'inertie

L : la longueur de volant d'inertie.

$$T_{\max} = \pi/16 \times \tau \times d_A^3 \quad (III.39)$$

$$T_{\max} = \pi/16 \times 80 \times d_A^3$$

$$T_{\max} = 2 \times C_v \quad (III.40)$$

$$T_{\max} = 2 \times 3.68 = 7.36 \text{ N.m}$$

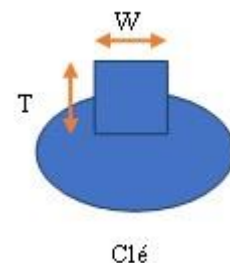
$$7.36 \times 10^6 = \pi/16 \times 80 \times d_A^3$$

$$d_A = 78 \text{ mm}$$

$$d_c = 156 \text{ mm.}$$

**f) Dimension de clé du volant d'inertie :**

- Selon la dimension standard de la clé pour le diamètre 78
- Largeur de clé  $W=22\text{mm}$ .
- Epaisseur de clé  $T=14\text{mm}$



### III.6 Finalement

**Tableau III.3** : Paramètres du système de stockage d'énergie de volante inertie.

	P (Kw)	$\omega$ (rad/s)	$C_n$ (N.m)	J ( $m^2.Kg$ )	$E_c$ (J)
Gèneratrice	1.1	245	4.48	0.00078	/
Moteur Dc	1.23	248	4.95	0.00262	/
Poulie 1 (Gèneratrice)	/	245	/	0.0015714	47.16
Poulie 2	/	275.63	/	0.001104	41.93
Poulie 3	/	275.63	/	0.001104	41.93
Poulie 4 (DC)	/	248	/	0.0015714	48.32
Volant d'inertie	1.21	275.63	4.4	2.125	66000

**Remarque :**

Le moment d'inertie et le poids de poulie 2, et de poulie 3 sont négligeables par rapport le moment inertie et le poids de volant d'inertie.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné le volant d'inertie suivant le moteur disponible. Le volant d'inertie présente beaucoup d'avantages comme élément de stockage de l'énergie, sa réalisation est simple et pas coûteuse.

Dans le prochain chapitre, nous avons décidé de l'appliquer à l'intérieur même de la nacelle, dans la turbine éolienne entre le multiplicateur et la MADA. Il permettra de relancer le mouvement de rotation grâce à son inertie.

# **Chapitre IV**

## **OPTIMISATION DU TEMPS DE FONCTIONNEMENT PAR L'INTRODUCTION D'UN VOLANT D'INERTIE**

## OPTIMISATION DU TEMPS DE FONCTIONNEMENT PAR L'INTRODUCTION D'UN VOLANT D'INERTIE

### IV .1 Introduction

La performance des éoliennes est complètement dépendante de la vitesse du vent appliquée aux pales. Dans ce chapitre, nous allons proposer un nouveau procédé qui permettra l'optimisation du temps de fonctionnement de l'éolienne par l'introduction d'un volant d'inertie à l'intérieur de la nacelle entre le générateur et le rotor

### IV.2 Proposition de la nouvelle Architecture du procédé

La figure (IV.1) représente la nouvelle architecture proposée. Dans cette dernière, nous avons ajouté un bloc se composant d'un volant d'inertie raccordé à un moteur (DC) relié à son tour à une commande et alimentation.

La diminution de la vitesse du vent cause la diminution de la rotation de la génératrice et par conséquent la puissance. A ce moment la commande intégrée au système détecte le ralentissement de la vitesse. A cet effet un signal est lancé par cette dernière qui fait alimenter le moteur (DC) qu'à son tour, il relance la rotation de la génératrice.

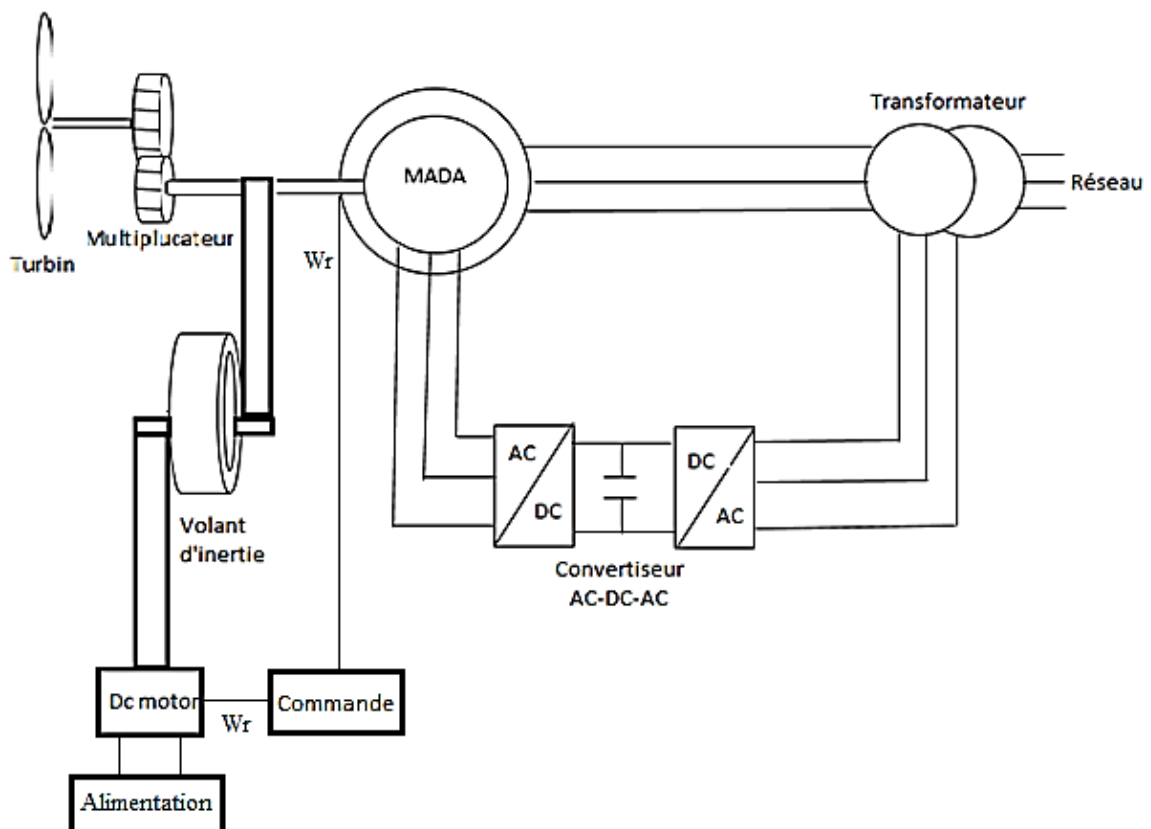


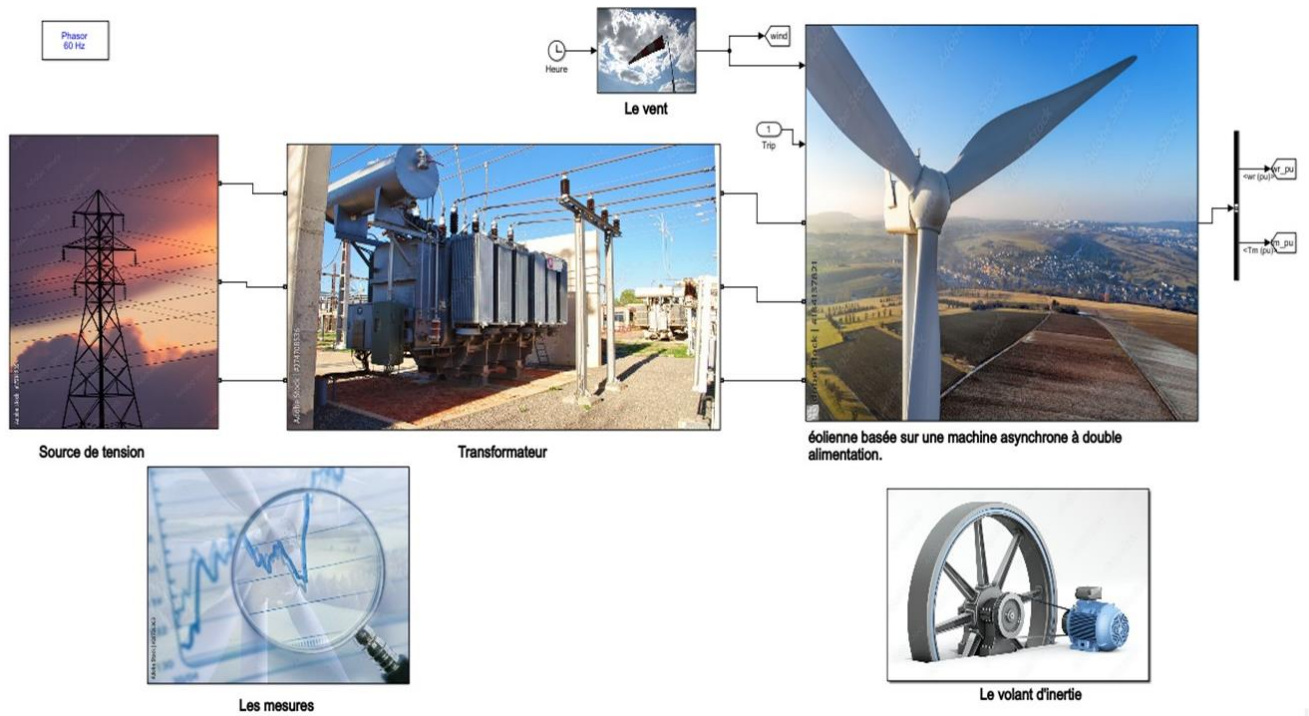
Figure (IV.1) : Schéma proposée pour l'optimisation de rendement

### IV.3. Rappel

Le tableau ci-dessus conclure tous les paramètres

**Tableau IV.1** : illustrations des paramètres

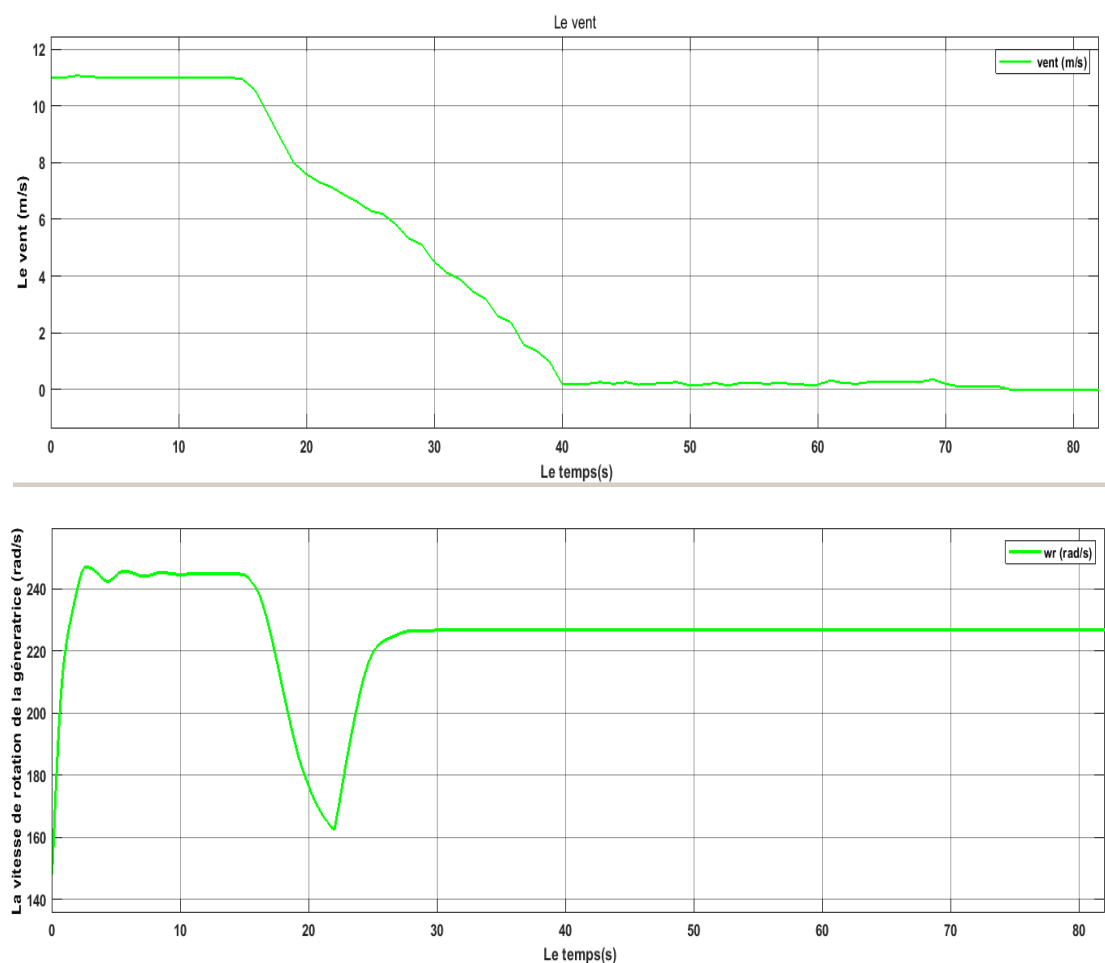
	P (KW)	$\omega$ (rad/s)	$C_n$ (N.m)	J ( $m^2$ .Kg)	$E_c$ (J)
Génératrice	1.1	245	4.48	0.00078	/
Moteur DC	1.23	248	4.95	0.00262	/
Poulie 1 (Génératrice)	/	245	/	0.0015714	47.16
Poulie 2	/	274.63	/	0.001104	33.85
Poulie 3	/	274.63	/	0.001104	33.85
Poulie 4 (DC)	/	248	/	0.0015714	48.32
Volant d'inertie	1.21	274.63	4.4	2.125	66000



**Figure (IV.2)** : Schéma de principe de simulation avec volant d'inertie

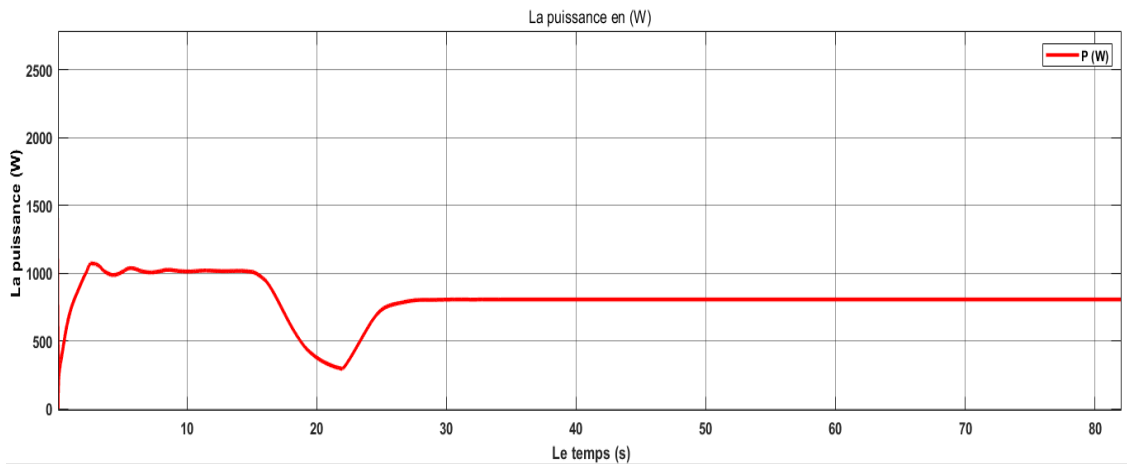
#### IV.4 Résultat

Les figures (IV.2- IV.3- IV.4- IV.5) présentent les résultats de simulations obtenus pour le système après l'introduction du volant d'inertie. D'après les figures (IV.2- IV.3) on remarque que la vitesse de rotation de la génératrice augmente à partir de sa valeur initiale (régime transitoire) jusqu'à atteindre son régime permanent, puis se dégrade en suivant la diminution de vitesse du vent jusqu'à atteindre la valeur environ de 7 (m/s). Cette vitesse est prédéfinie au départ dans le programme de simulation. Elle permet à la commande de lancer un signal au moteur (DC) qui va relancer la rotation de la génératrice.



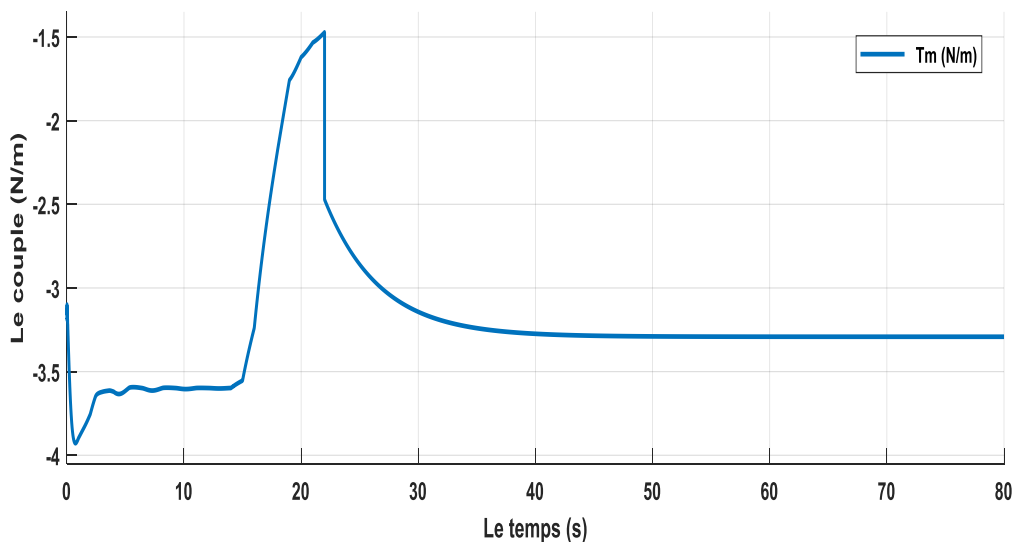
**Figure (IV.3) :** la vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor en fonction du temps

La figure (IV.4) représente la puissance mécanique de la turbine en fonction de temps on voit que la puissance elle est à un régime transitoire lors du démarrage puis se stabilise à un régime permanent après la diminution de vent jusqu'à l'instant (22s) on voit l'effet d'introduire le volant que la puissance reprend sa valeur nominale.



**Figure (IV.4) :** la puissance mécanique de la turbine en fonction de temps

La figure (IV.5) représente le couple mécanique en fonction de temps on voit que le couple il a un régime transitoire lors du démarrage puis se stabilise à un régime permanent après la diminution de vent dans l'instant (22s) on voit l'effet d'introduire le volant que le couple reprend sa valeur nominale.



**Figure (IV.5) :** le couple mécanique de la turbine en fonction du temps

## IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle d'étude proposé, accompagné d'un bref rappel des paramètres du système. Au fur et à mesure, nous avons illustré les résultats de simulations effectuées pour le cas d'intégration de notre volant d'inertie, qui sont présentés sous forme de graphes. Ces résultats nous permettent de déduire l'optimisation du rendement et s'ont confirmé l'efficacité de notre proposition.



# **Conclusion générale**

## CONCLUSION GENERALE

En conclusion, notre étude approfondie sur les éoliennes a permis de mettre en évidence plusieurs aspects importants relatifs à la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Nous avons examiné en détail les composants des systèmes de conversion, les différents types d'éoliennes ainsi que leur description et leur fonctionnement. Nous avons également réalisé une modélisation approfondie de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en étudiant sa structure, ses modes de fonctionnement et en développant un modèle dynamique dans les plans ABC et dq.

Pour évaluer les performances du système, nous avons mené des simulations dans différentes conditions de vent. Tout d'abord, nous avons observé les résultats à une vitesse de vent fixe, puis nous avons simulé le système avec une diminution de la vitesse du vent, ce qui nous a permis d'évaluer la robustesse de notre système face aux variations des conditions atmosphériques.

Par la suite, nous avons abordé l'étude et le dimensionnement du volant d'inertie ainsi que des quatre poulies adaptées à notre système. Cette partie a mis en évidence l'importance du stockage d'énergie et de la gestion des fluctuations de puissance pour assurer une production électrique stable et fiable.

Enfin, nous avons intégré le volant d'inertie dans notre système et réalisé une dernière simulation en utilisant une vitesse de vent dégradée. Les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité de notre proposition, démontrant ainsi son potentiel dans la production d'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne. Notre système a montré une capacité notable à compenser les fluctuations de la vitesse du vent dans des courtes périodes qui ne dépassent pas (60s) grâce à la présence du volant d'inertie, ce qui a amélioré son rendement global.

En résumer, notre étude a mis en lumière l'importance des éoliennes dans la production d'énergie renouvelable. En intégrant des composants tels que la MADA et le volant d'inertie, il est possible d'optimiser la conversion de l'énergie éolienne et de garantir une production électrique plus stable et efficace. Ces avancées technologiques contribuent à la transition énergétique en fournissant une alternative propre et durable aux sources d'énergie conventionnelles.

# **Références bibliographiques**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adnane Zaimi. Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents. Energie électrique. 2014. dumas-01222261.
- Axenne, (2008) « petit éolien » Usages raccordés au réseau, conseil général des Landes, 2008.
- Bencherif, Y. A. (2008). Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne (Doctoral dissertation).
- Chazallon, M. Lefranc, H.J. Mikkelsen (2008) « Conception d'éolienne » ; INSA de Strasbourg – Spécialité Génie Civil, Juin 2008.
- C.Ploesteanu, D.Tarziu, T.Maitre,(2012) « Modélisation de l'écoulement dans une turbine Darrieus à nombre de Reynolds modéré ».9ème journée de l'hydrodynamique 10.11.12 Mars 2012.
- Delord Jean- David, ROGER Emmanuel, Lycée Maximilien Perret – Alfortville Académie de Créteil 03 juil 2015
- El Aimani, S. (2004). Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille).
- Elbia Youcef (2009) « Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté », mémoire de magister, université de Batna, Soutenu le 15/06/2009.
- Gasmi, M., Mediani, A., Harrouz, A. (2014). Modélisation et simulation d'un système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation (Université Ahmed Draia-ADRAR).
- H. Fatmaoui, (2013) « éléments de base de l'aérodynamique des pales d'éoliennes », Master GMEE/FSA, Université Ibn Zohr, faculté des sciences, Maroc, 2013.
- Haritza Camblong, (2003) « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003.
- Ludovic, L. (2004). « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes (Thèse de Doctorat : Génie Electrique : Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Asq, 2004, 171 p).
- M. Sathyajith, "Wind Energy Fundamentals, Resources Analysis and Economics," Springer Berlin Heidelberg New York, 27 February 2006, pp. 132-151.

- Marc Rapin, Jean-Marc Noël « L'énergie éolienne Du petit éolien à l'éolien offshore » 2019
- N. Brahmi, Z. Chanoun (Juin 2012), Introduction des Machines Asynchrones à Double Alimentation dans les Véhicules Électriques, Université A/Mira – Béjaïa.
- Nazari A, Heydari H. (2011) « A Survey on Different Direct Power Control Algorithms of DFIGs ». 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference; Tehran; p. 10-14, 2011.
- Philippe Leconte, Marc Rapin, Edmond Szechenyi, (éoliennes) , ingénieur de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, France, 1999.
- S.Drid.(2005) « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation ». Université de Batna. Thèse de doctorat 2005.
- S.Weibel, (2013)« Café climat petit éolien - », Association Française des Professionnels du petit éolien, France, 11 juin 2013
- Zerari Naziha (2015) « Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille » Soutenu publiquement le 17 /09/ 2015
- <https://energieplus-lesite.be/> « Rendement des éoliennes »
- <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/5660/5660-3-aerogenerateur-presentation.pdf>
- <http://ulm5305.phpnet.org/wp-content/uploads/2018/09/art088>
- <https://energieplus-lesite.be/techniques/eolien6/eoliennes/>
- [www.liebherr.com](http://www.liebherr.com)
- <http://www.8-e.fr/2014/02/volants-dinertie.html>

# **Annexe**

## ANNEXE

Tableau (A.1) : Valeurs des paramètres du réseau pour la simulation d'un DFIG

Equipment	Paramètre	Value	Unité
Trois sources de courant alternatif triphasé	Tension phase à phase	25	kV
	Angle de phase de la phase A (degrés)	0	deg
Transformateur triphasé (25 kV/575 V)	Capacité	47	MVA
	L'enroulement 1	Yg	-
	L'enroulement 2	Delta (D1)	-
	Tension primaire	25	kV
	Tension secondaire	400	V
	Fréquence	60	Hz
	Première résistance (R1)	0.002	pu
	Première inductance (L1)	0.08	pu
	Secondaire résistance (R2)	0.002	pu
	Secondaire inductance (L2)	0.08	Pu
	Magnétisation résistance (Rm)	500	$\Omega$
	Magnétisation inductance (Lm)	500	H
	Fréquence nominale	60	Hz
Charge triphasée RLC en parallèle	Tension nominale phase à phase	1000	Vrms
	Puissance active P	1.1e3	w
	Tension nominale (L-L)	400	V
Données du générateur	Fréquence	60	Hz
	Stator résistance (Rs)	0.00706	pu
	Stator inductance (Ls)	0.171	pu
	Rotor Resistance (Rr')	0.005	pu
	Rotor inductance (Lr')	0.156	Pu
	Magnétisation inductance (Lm)	2.9	Pu
	Constante d'inertie du générateur (H)	5.04	S
	Paires de pôles	2	p
	Facteur de frottement	0.01	Pu

Données de la turbine	Puissance de sortie mécanique nominale de l'éolienne	1.1e3	KW
	Puissance au point C	0.73	PU
	Vitesse du vent au point C	8	m/s
	Gain du régulateur d'angle de pas	500	-
	Angle de pas maximum	45	deg
	Taux de variation maximal de l'angle de pas	2	Deg/s
Données des convertisseurs	Conversion de puissance maximale	0.5	Pu
	Inducteur de couplage côté réseau (L)	0.15	Pu
	Résistance de couplage côté réseau (R)	0.0015	Pu
	Tension nominale du bus DC	1000	V
	Condensateur du bus DC	10e-2	F
Données du contrôleur	Mode	Voltage regulation	-
	Référence de courant réactif généré par le convertisseur côté réseau ( $I_{q\_ref}$ )	0	pu
	Gain du régulateur de tension côté réseau ( $k_p$ )	1.25	-
	Gain du régulateur de tension du réseau ( $k_i$ )	300	-
	Droop Xs	0.02	Pu
	Gain du régulateur de puissance ( $k_p$ )	1	-
	Gain du régulateur de puissance ( $k_i$ )	100	-
	Gain du régulateur de courant du convertisseur côté rotor ( $k_p$ )	0.3	-
	Gain du régulateur de courant du convertisseur côté rotor ( $k_i$ )	8	-
	La valeur maximale du taux de variation de la tension de référence du réseau	100	Pu/s
	La valeur maximale du taux de variation des courants de référence du convertisseur	200	Pu/s