

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie mécanique**

**Spécialité : énergétique**

### **THÈME**

## **Etude et simulation des performances d'une turbine éolienne**

*Préparé par : Mr Hamrelaine Mostapha  
M.Safa sara*

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Signature</b>	<b>Qualité</b>
<b>MEKROUSSI SAID</b>	MCA		Président
<b>KOULALI MUSTAFA</b>	MAA		Examineur 1
<b>BERKANI ABDRAHMANE</b>	MAA		Examineur 2
<b>MEGADI KARIM</b>	MCA		Encadreur

## *Remerciement*

*Nous tenons à remercier tout d'abord Allah, seigneur de l'univers,  
pour la volonté, la santé, qui nous a donnée durant toutes ces  
longues années. A lui toute louange*

*Nous tenons à remercier notre encadreur*

*Mr : Negadi Karim pour son précieux conseil et nous avoir  
guidées durant toute la période du travail avec sérénité patience  
et objectif.*

*Nos vifs remerciement vont également aux membres du jury pour  
l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant*

*d'examine notre travail et de l'enrichir par leur propositions*

*Nous tenons également à remercier tous les personnes qui ont  
aidé et se tenu et participé de près ou de loin à la réalisation de ce  
travail.*

*Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*A mon chère père (que dieu ait son âme)*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude*

*A tous les membres de ma famille Hamrlaine et Nouar, petits et grands*

*A mes chères ami (e)s :*

*H. Mostapha*

*Dédicaces*

*Que ce travail témoigne de mes respects :*

*A mes parents :*

*Grace à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.*

*Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*A mes sœurs et à mes frères. A ma famille SAFA.*

*Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.*

*S.SARA*

## Liste de notation et symboles

- S : section balayée par l'éolienne.
- V : la vitesse de vent.
- $\rho$  : la masse volumique de l'air.
- F : la force exercée par l'éolienne.
- $P_{\text{aer}}$  : la puissance absorbée par l'éolienne (extraite).
- $P_{\text{mt}}$  : la puissance mécanique théorique.
- $C_p$  : coefficient de puissance.
- $\lambda$  : vitesse relative de l'éolienne.
- $\omega$  : vitesse angulaire de l'éolienne.
- N : vitesse de rotation du rotor.
- $\Omega_{\text{tur}}$  : vitesse angulaire mécanique de la turbine.
- R : rayon de la turbine.
- $C_{\text{théo}}$  : couple théorique.
- $C_{\text{couple}}$  : coefficient de couple.
- $C_{\text{turbine}}$  : couple turbine.
- $C_{\text{aer}}$  : couple aérodynamique.
- $\beta$  : l'angle d'inclinaison des pales.
- dI : la portance.
- dD : la force de trainée.
- dF<sub>a</sub> : poussée axial.
- F<sub>t</sub> : poussée tangentielle.
- G : gain de vitesse.
- J<sub>T</sub> : inertie turbine.
- J<sub>g</sub> : inertie de générateur.
- $C_{\text{em}}$  : couple électromagnétique.
- f<sub>T</sub> : le coefficient de frottement visqueux de la turbine.
- f<sub>g</sub> : le coefficient de frottement de générateur.
- $\Omega_{\text{g}}$  : vitesse de rotation de générateur.
- $\Omega_{\text{mec}}$  : vitesse de rotation mécanique.
- I<sub>T</sub> : inertie total des parties tournantes.
- f<sub>i</sub> : coefficient de frottement visqueux totale.
- $C_T$  : couple total de l'éolienne.
- MSAP: Machine synchrone à aimant permanent.
- MADA: Machine asynchrones a double alimentation.

[V] : Vecteur tension.

R : la résistance.

[I] : Vecteur courant.

[L] : l'inductance.

[ $\Phi$ ] : Vecteur le flux.

$\theta$ : angle électrique.

d, q, o: système d'axe dans le référentiel de Park.

a, b, c: indice correspond a trois phases.

[P] : la transformation de Park.

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes.

Tableau I.1 : Principaux pays producteurs d'électricité par l'éolienne en 2016. (IEA).....	3
Tableau I.2 : classification des éoliennes selon la puissance et le diamètre de leur hélice.....	7
Tableau I.3 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	8
Tableau I.4 : Les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontale et axe vertical.....	10

## Chapitre III : Modélisation de la MSAP

Tableau III.1: les avantages et les inconvénients de la machine synchrone et asynchrone.....	4
--	---

# Liste des figures

## Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes.

Figure I.1 : Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes. ....	3
Figure I.2 : Eolienne d'Adrar .....	5
Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	6
Figure I.4 : Les éoliennes Offshore .....	7
Figure I.5 : Les éolienne On shore .....	7
Figure I.6 : Eoliennes à axe vertical.....	9
Figure I.7 : Eoliennes à axe Horizontal. ....	9
Figure I.8 : Transport d'une pale d'éolienne. ....	11
Figure I.9 : Moyeu sur lequel les pales ont sont fixées.....	11
Figure I.10 : La girouette et l'anémomètre.....	12
Figure I.11 : Multiplicateur et son schéma de fonctionnement. ....	13
Figure I.12 : Alternateur d'éolienne, puissance 5'000 kW.....	14

Figure I.13 : Pose de la première section du mât.....	14
Figure I.14 : Différents types de tour. ....	15
Figure I.15 : Les fondations de grandes éoliennes.....	16
Figure I.16 : Eléments constitués dans la turbine. ....	17
Figure I.17 : Éolienne à axe horizontal deux pales et mono pale.....	20
Figure I.18 : Accidents des éoliennes. ....	21

## **Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.**

Figure II.1 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne. ....	23
Figure II.2 : Variations du coefficient de puissance.....	25
Figure II.3 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite $\lambda$ pour différents types de turbines.....	26
Figure II.4 : Eléments caractéristiques d'une pale. ....	30
Figure II.6 : Forces appliquées sur un tronçon de pale.....	31
Figure II.7 : Caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour cinq valeurs de $\beta$ . ....	32
Figure II.8 : Schéma modèle de turbine.....	33
Figure II.9 : Modèle de la turbine.....	34
Figure II.10 : Modèle simplifié de la turbine. ....	35
Figure II.11 : schéma bloc d'une turbine éolienne.....	36

## **Chapitre III : Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.**

Figure III.1: Mode isolé. ....	40
Figure III.2 : Mode connecté au réseau. ....	40
Figure III.3 : Machines asynchrones à cage d'écureuil. ....	41
Figure III.4 Représentation de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique	44
Figure III.5: Passage des composantes triphasées aux composantes de Park.....	45
Figure III.6: Schéma équivalent de la machine synchrone dans le repère d-q. ....	46

Figure III.7: famille de convertisseur statique. ....	48
Figure III.8 : Description de l'éolienne. ....	49

#### **Chapitre IV : Résultats des simulations du système éolien.**

Figure IV.1 : architecture d'un système éolien isolé.....	50
Figure IV.2 : Schéma bloc de la turbine éolienne. ....	51
Figure IV.3 : Modèle du système étudié.....	52
Figure IV.4 : Les éléments de la turbine.....	52
Figure IV.5 : Modèle de la turbine. ....	53
Figure IV.6 : Schéma bloc de la MSAP.....	53
Figure IV.7 : Model de la MSAP.....	54
Figure IV.8 : Model de la MSAP.....	54
Figure IV.9 Model de la MSAP:.....	54
Figure V.10 : Paramètres de la simulation. ....	55
Figure IV.11 : Les paramètres de la turbine.....	56
Figure IV.12 : Les paramètres de la GSAP. ....	57
Figure IV.13 : Le profil de la vitesse du vent. ....	58
Figure IV.14 : Vitesse rotorique de la GSAP (rad/s). ....	58
Figure IV.15 : Couple mécanique (N.m). ....	59
Figure VI.16 : La puissance mécanique (w).....	59
Figure IV.17: La tension électrique (v).....	60
Figure IV.18 : La puissance électrique active(W) et réactive(Var). ....	61
Figure IV.19 Le Couple électromagnétique(N.m). ....	61
Figure IV.20 : Le profile de la vitesse du vent. ....	62
Figure IV.21 : Vitesse rotorique de GSAP (Rad/s).....	62
Figure IV.22 : Le couple électromagnétique (N.m).....	63
Figure IV.23 : Le couple mécanique (N.m). ....	63

Figure IV.24 Puissance mécanique (W).....	64
Figure IV.25 La tension électrique (V).....	65
Figure IV.26 : Allure de la puissance active et réactive.....	66

# Table de matière

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes.</b>	
I.1 Introduction : .....	2
I.2 Capacité mondiale des éoliennes : .....	2
I.3 Capacité des éoliennes en Algérie : .....	4
I.4 Aspects sur l'énergie éolienne : .....	5
I.4.1 Définition : .....	5
I.4.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne : .....	5
I.4.3 Production d'une éolienne : .....	6
I.4.4 Puissance et dimensions des aérogénérateurs : .....	6
I.4.5 Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne : .....	7
I.4.6 Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne : .....	7
I.4.7 Types des éoliennes : .....	8
I.4.7.1 Eoliennes à Axe Horizontal : .....	8
I.4.7.2 Eoliennes à Axe verticale : .....	9
I.5 Caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal: .....	10
I.5.1 La nacelle : .....	10
I.5.1.1 Le rotor : .....	10
I.5.1.2 Le moyeu : .....	11
I.5.1.3 La girouette et l'anémomètre: .....	12
I.5.1.4 Le dispositif d'orientation : .....	12
I.5.1.5 Le système de freinage : .....	12
I.5.1.6 L'arbre principal : .....	12
I.5.1.7 Le multiplicateur : .....	12
I.5.1.8 L'arbre secondaire : .....	13
I.5.1.9 La génératrice : .....	13
I.5.2 Le mât (tour) : .....	14

I.5.2.1 Hauteur de tour l'éolienne :	15
I.5.3 La fondation :	16
I.6 Contrôle et entretien :	17
I.7 Fonctionnement de l'éolienne:	17
I.7.1 Arrêt de l'éolienne :	18
I.7.1.1 Arrêt automatique :	18
I.7.1.2 Arrêt manuel :	19
I.7.1.3 Arrêt manuel d'urgence :	19
I.7.1.4 Absence de vent :	19
I.8 Pourquoi la plupart des éoliennes ont-elles trois pales ?	19
I.9 Elles ne sont pas à l'abri d'un accident :	20
I.10 Conclusion :	22

## **Chapitre II : Modélisation de la chaine de conversion éolienne.**

II.1 Introduction :	23
II.2 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :	23
II.2.1 Loi de BETZ :	23
II.2.2 Valeurs pratiques du coefficient de puissance en fonction du type de turbine :	26
II.2.3 La force effective dans le rotor (F) :	27
II.2.4 Le couple théorique Cthéor:	27
II.2.5 Coefficient de couple Ccouple:	27
II.2.6 La relation entre Cp et $\lambda$ :	27
II.2.7 Le couple aérodynamique $C_{aer}$ :	28
II.3 Classification des éoliennes selon leur vitesse :	28
II.3.1 L'angle d'inclinaison ( $\beta$ ) :	29
II.3.1.1 Effort sur une pale d'éolienne :	31
II.3.2 Relation du coefficient de puissance avec l'angle de calage et la vitesse relative :	32
II.4 Modèle de la turbine d'éolienne :	33

II.4.1 L'équation dynamique de la turbine: .....	34
II.4.2 Hypothèses simplificatrices : .....	34
II.5 Modèle du multiplicateur: .....	35
II.6 Modèle de l'arbre : .....	36
II.7 Conclusion : .....	37

### **Chapitre III : Modélisation de la machine synchrone à aimants permanent.**

III.1 Introduction : .....	38
III.2 Les machines électriques dans les aérogénérateurs : .....	38
III.2.1 Machine synchrone : .....	38
III.2.1.1 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) : .....	38
III.2.1.2 Les domaines d'application de MSAP : .....	39
III.2.1.3. Les modes d'utilisation.....	39
III.2.2.Machines asynchrones : .....	40
III.2.2.1.Machines asynchrones a cage d'écureuil : .....	40
III.2.2.2.Machines asynchrones a double alimentation (MADA) : .....	41
III.2.3 Les avantages et les inconvénients des machines électriques .....	41
III.3 Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) : .....	42
III.3.1 Principe de fonctionnement de la MSAP : .....	42
III.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents : .....	43
III.4.1 Les hypothèses simplificatrices : .....	43
III.4.2 Equations de la machine: .....	43
III.4.3 Transformation de Park : .....	45
III.5 Modélisation de la machine synchrone a aimant permanents .....	46
III.5.1 Equation de la MSAP dans le repère d, q lié au rotor : .....	47
III.6 Convertisseur statique : .....	47
III.6.1 Hacheur (DC/DC) : .....	49
III.6.2 Redresseurs (AC/DC) : .....	49

III.6.3 Onduleur (DC/AC) : .....	49
III.7 Conclusion: .....	50

**Chapitre IV : Résultats des simulations du système éolien.**

IV.1 Introduction : .....	50
IV.2 Architecture du système : .....	50
IV.3 Modèle du profil du vent sous Matab/Simulink : .....	51
IV.4 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents : .....	54
IV.5 Simulation du système avec turbine : .....	55
IV.5.1 Vitesse du vent fixe : .....	55
IV.5.1.1 Les paramètres de la turbine éolienne utilisée : .....	56
IV.5.1.2 Paramètres de la GSAP : .....	56
IV.5.2. Vitesse du vent variable : .....	62
IV.5. Conclusion .....	66
Conclusion générale .....	68
Bibliographie .....	69

# Introduction générale

### **Introduction générale :**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Le vent est une source d'énergie cinétique renouvelable qui présente un potentiel considérable dans plusieurs régions du monde. L'énergie que peuvent capter les éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs

L'aérogénérateur est basé sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort, les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne se développe à un rythme très croissant et cela grâce au niveau important de la puissance produite des éoliennes, ainsi qu'aux incitations financières importantes des différents pays largement participant à son essor, les avantages de l'énergie éolienne sont indéniables et le coût de leur déploiement est métrisable.

Dans ce cadre, le présent mémoire a pour objectif de concevoir les lois de commande des turbines éoliennes utilisant la machine asynchrone à double alimentation. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible afin d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Le premier chapitre est consacré à la description de l'énergie éolienne et des notions principales sur cette technologie. La présentation de la modélisation de la turbine éolienne.

Le second chapitre comporte la modélisation des éléments de la chaîne de conversion.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande du système de conversion électrique de la machine asynchrone à double alimentation intégrée dans un système éolien.

Les résultats de simulation par Matlab/Simulink seront présentés par la suite dans le quatrième chapitre.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation.

# Chapitre I

## Généralité sur les systèmes éoliennes

---

# Chapitre I

## Généralité sur les systèmes éoliennes

---

### I. Généralité sur les systèmes éoliennes

#### I.1. Introduction :

Le vent est une énergie naturelle capable de créer de l'électricité ou une force mécanique : c'est l'énergie éolienne. Le mot éolien vient du grec « Éole », dieu du vent, signifiant « rapide » « vif » et qui désignait dans l'antiquité grec le dieu du vent. Ce mot est également utilisé pour nommer les machines qui utilisent cette énergie.

L'utilisation de cette énergie n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre.

Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité.

De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie au vue de la consommation croissante en énergie. Malheureusement leur implantation n'est pas possible dans tous les lieux, notamment dans les sites naturels protégés. Par ailleurs le bruit qu'elles émettent et leur esthétique dérangent certains riverains. Ainsi leur potentiel d'énergie d'avenir n'est pas encore exploité au maximum.

[1]

#### I.2. Capacité mondiale des éoliennes :

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte dans tous les pays du monde.

L'Europe a été pionnière dans le développement de l'éolien puis l'Asie et l'Amérique du Nord ont largement pris la tête, installant durablement l'éolien comme source de production d'électricité, soutenue par des politiques de baisse d'émissions de CO<sub>2</sub>.

En 2016, La Chine est le premier producteur d'électricité à partir de l'éolien avec 237,07 TWh (24,7% de la production mondiale), les Etats-Unis occupent la deuxième place (229,47 TWh soit 24 %) et l'Allemagne, la troisième place (78,6 TWh soit 8,2 %). La France est dans le Top 10 avec une production de 21,4 TWh soit 2,2 % de la production mondiale.

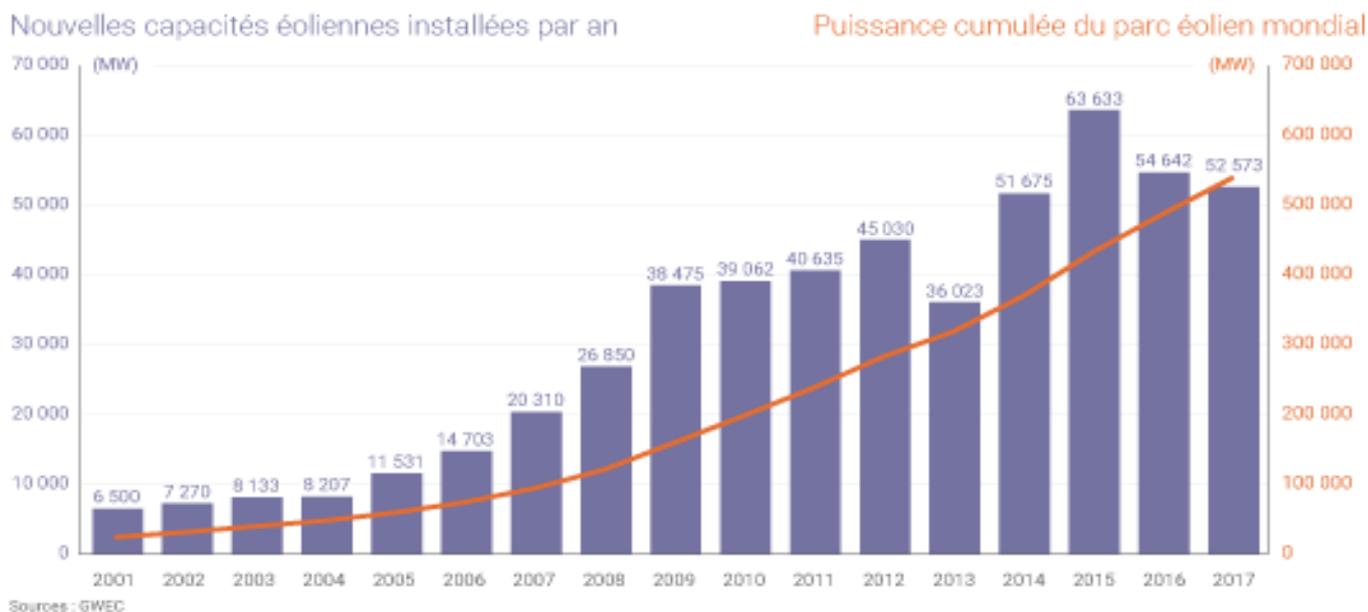
En 2017, la capacité installée mondiale de l'éolien en mer (ou éolien offshore), s'élève à 18,81 GW. Cela représente une progression + 23 % par rapport à 2016.

Le Royaume-Uni (6,84 GW), l'Allemagne (5,35 GW) et la Chine (2,79 GW) occupent le podium des plus grands parcs éoliens en mer.[2]

pays	Twh	%
Chine	237.07	24.75%
Etats-Unis	229.47	23.96%
Allemagne	78.6	8.21%
Espagne	48.09	5.02%
Inde	44.85	4.68%
Royaume-Unis	37.37	3.90%
Brésil	33.49	3.50%
canada	30.75	3.21%
France	21.4	2.23%
Italie	17.7	1.85%

**Tableau I.1 :** Principaux pays producteurs d’électricité par l’éolienne en 2016. (IEA)

### Évolution de la puissance du parc éolien mondial



**Figure I.1 :** Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes.

### **I.3. Capacité des éoliennes en Algérie :**

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie.

De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature ; Ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performantes et, de plus en plus grandes.

Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 kW avec un diamètre de 15 m en 1989 est aujourd'hui de 7.5 MW, avec un diamètre de 127 m environ (ENERCON).

La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 135 mètres. La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6 GW en 1996, est passée à 215 GW en juin 2011. Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance sera implantée à Adrar. Cette ferme devrait être fonctionnelle en 2012. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Énergies Renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme , pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030.[3]



**Figure I.2 :** Eolienne d'Adrar

## **I.4. Aspects sur l'énergie éolienne :**

### **I.4.1. Définition :**

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. C'est une énergie qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le vent, est disponible partout dans le monde et totalement gratuite.

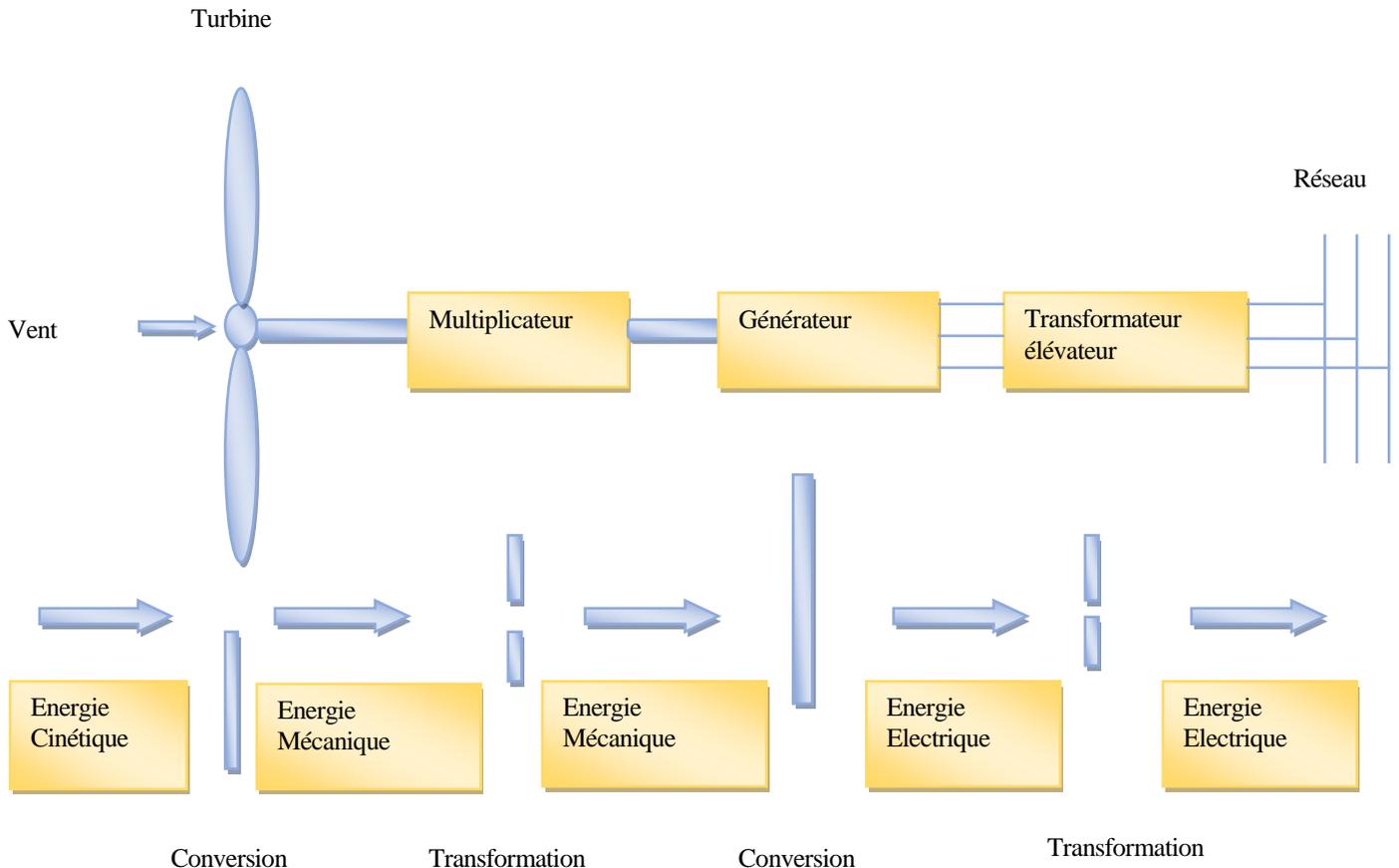
L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

- **La transformation en énergie mécanique :** le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- **La production d'énergie électrique :** l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif.

### **I.4.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne :**

- Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes : [4]
- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique transmise en suite au réseau électrique.



**Figure I.3 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent. [5]

### I.4.3. Production d'une éolienne :

L'exploitation de l'énergie électrique produite par une éolienne peut se faire de deux manières , selon qu'elle soit connectée au réseau ou alimentant une charge isolée.

- Eolienne connectée au réseau.
- Eolienne alimentant une charge isolée.

### I.4.4. Puissance et dimensions des aérogénérateurs :

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [6], ainsi nous avons :

- Les éoliennes de petite puissance : inférieures à 40 KW
- Les éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW
- Les éoliennes de forte puissance : supérieures à 1 MW.

De plus, le tableau ci-dessous propose une classification de ces éoliennes selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice :

Eolienne	Diamètre de l'hélice	Puissance
Petite	Moins de 12m	Moins de 40KW
Moyenne	12m à 45m	De 40KW à 1 MW
Grande	46m et plus	1MW et plus

**Tableau I.2 :** classification des éoliennes selon la puissance et le diamètre de leur hélice

#### **I.4.5. Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne :**

- ❖ Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
- ❖ Les éoliennes dites « offshore » sont installées en mer.



**Figure I.4 :** Les éoliennes Offshore



**Figure I.5 :** Les éolienne On shore

#### **I.4.6. Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne :**

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie présente des inconvénients qu'il est nécessaire de palier pour qu'elles ne constituent pas un frein à son développement.

Le tableau ci-dessous montre les avantages et inconvénient de l'énergie éolienne : [7] [8]

Avantages	Inconvénients
L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement.	L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo.
L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules).	Possède un mécanisme bruyant.
L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant.	Le coût de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.
L'énergie éolienne ne produit pas de déchets toxiques.	L'impact visuel, « ça reste néanmoins un thème subjectif »
L'énergie éolienne produit de l'électricité : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.	La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les Aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
Le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.	
La surface occupée au sol est peu importante.	
C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.	
Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. Le cout d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.	

**Tableau I.3 :** Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

### **I.4.7. Types des éoliennes :**

Il existe 2 types d'éoliennes : les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical

#### *I.4.7.1. Eoliennes à Axe Horizontal :*

Le principe de l'éolienne à axe horizontal est simple et rappelle celui du moulin à vent. C'est le type d'éolienne le plus répandu, le plus connu. C'est également celle qui présente les meilleurs rendements ; Par contre, parmi ses inconvénients, c'est la plus chère et elle nécessite beaucoup de place donc doit être implantée en zone rurale ou en mer.

#### *1.4.6.1. Eoliennes à Axe verticale :*

Les éoliennes à axe vertical sont les plus abordables. Elles peuvent fonctionner et produire de l'énergie même avec des vents faibles. Elles se fixent aisément sur le toit d'un bâtiment. De plus, ce type d'éolienne est relativement silencieux.

Cependant, elles sont moins connues et répandues que les éoliennes à axe horizontal. Elles ont le désavantage de ne pas pouvoir capter des vents très puissants car elles se trouvent très près du sol. Par conséquent, leur rendement est inférieur à l'éolienne à axe horizontal.

Leur principal défaut est leur difficulté à démarrer. Leur poids repose sur le socle et les frottements sont importants.[9] [10]



**Figure I.6 :** Eoliennes à axe vertical.



**Figure I.7 :** Eoliennes à axe Horizontal.

Parmi les avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontale et axe verticale, nous avons : [11] [12] [13]

	Horizontal	Verticale
Avantage	Cout limité	De conception plus simple que les machines à axe horizontal
	Peu de contraintes mécaniques	Elle est plus facile d'accès
	Grande efficacité	La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol
Inconvénient	Bruit conséquent	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal
	Vibrations non négligeables	Les éoliennes ne démarrent pas automatiquement, il faut utiliser la génératrice comme moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne
	Grande sensibilité au flux éolien et sa variation	Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

**Tableau I.4 :** Les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontale et axe vertical.

### **I.5. Caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal :**

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire. Nous présentons dans ce qui suit dans l'ordre de construction les différentes parties d'une éolienne :

#### **I.5.1. La nacelle :**

Contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique : les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur se trouvent : la boîte de vitesse, la génératrice, les systèmes de contrôles, le capteur de température, le capteur de vibration et le capteur de vitesse. La nacelle se situe à environ 60 mètres au-dessus du sol.

Elle comporte donc les éléments suivants :

##### *I.5.1.1. Le rotor :*

Le rotor est une gigantesque hélice à trois pales orientables. Elles sont le plus souvent en fibre de verre et en fibre de carbone. Une pale peut atteindre 70 m. de longueur et peser jusqu'à près de 30 tonnes. Elles

ont le profil d'une aile d'avion, arrondi sur le bord d'attaque, plat sur le bord de fuite. Elles sont faiblement vrillées, ce qui signifie que leur incidence par rapport au vent varie du centre vers l'extrémité. En tournant à une vitesse comprise entre 12 et 20 tours/minute, la vitesse de l'extrémité d'une pale peut dépasser 500 km/h ! La force centrifuge qui s'exerce sur les pales en rotation nécessite un solide arrimage sur le moyeu.



**Figure I.8 :** Transport d'une pale d'éolienne.

#### *1.5.1.2. Le moyeu :*

Le moyeu supporte les pales du rotor. Il est soumis à toutes les contraintes mécaniques exercées par le rotor. C'est une pièce d'acier solide et massive. Il est solidaire de l'axe de rotation appelé "arbre lent", dont la vitesse de rotation, qui correspond à celle du rotor, est comprise entre 15 et 30 tours/minute. Il comprend aussi le système qui permet de faire varier le pas des pales en fonction de la force du vent. Un puissant système de freinage à disque est installé sur l'axe du rotor qui permet de l'arrêter lorsque le vent devient trop tempétueux.



**Figure I.9 :** Moyeu sur lequel les pales ont été fixées.

### *1.5.1.3. La girouette et l'anémomètre :*

La girouette et l'anémomètre permettent de connaître la direction et la vitesse du vent, Ils participent ainsi à l'autonomie presque complète des éoliennes, ils sont souvent associés à un dispositif d'orientation de l'éolienne.



**Figure I.10 :** La girouette et l'anémomètre [39]

### *1.5.1.4. Le dispositif d'orientation :*

Il est situé sous la nacelle, il permet d'orienter les pales face au vent d'après les données recueillies par la girouette et l'anémomètre. Il est principalement composé d'un puissant moteur capable de faire pivoter toute la partie supérieure de l'éolienne.

### *1.5.1.5. Le système de freinage :*

Il est très important dans une éolienne, le dysfonctionnement des freins peut être fatal à l'éolienne. Le freinage a d'ailleurs été l'un des premiers problèmes rencontrés par les constructeurs lors des débuts des éoliennes. Pour des vents trop forts le générateur s'emballe et peut alors détruire de nombreux composants de la nacelle. Ainsi le système de freinage s'impose pour des vents dépassants les 90km/h, il permet alors d'empêcher le rotor de tourner.

### *1.5.1.6. L'arbre principal :*

Cet axe est directement entraîné par le rotor (principalement par les pales), il tourne à basse vitesse mais avec beaucoup de force (couple fort). Il est relié ensuite à un multiplicateur.

### *1.5.1.7. Le multiplicateur :*

C'est un convertisseur de puissance, il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique, en multipliant parfois par 70 la vitesse de rotation initiale. Il est constitué d'un assemblage d'engrenages. La vitesse de rotation d'une roue à une autre est multipliée par le nombre de dents de la plus grande roue sur le nombre de dents de la plus petite. Le rendement est variable suivant la puissance transmise, mais il est environ de 97%. La lubrification peut se faire par barbotage ou par injection forcée. Le refroidissement est souvent à air. Le multiplicateur est monté sur plots élastiques (plots de caoutchouc) pour amortir les vibrations et limiter la transmission du bruit à la structure porteuse.

3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Leur utilisation se généralise de plus en plus; cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voir coaxiaux.
- Le multiplicateur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.



**Figure I.11** : Multiplicateur et son schéma de fonctionnement.

#### *1.5.1.8. L'arbre secondaire :*

Comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

#### *1.5.1.9. La génératrice :*

La génératrice convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les génératrices des éoliennes doivent pouvoir fonctionner avec une source de puissance (c.-à-d. le rotor de l'éolienne) qui fournit une puissance mécanique (un couple) très fluctuante. Il faut refroidir les génératrices lorsqu'elles travaillent. Sur la plupart des éoliennes, on assure ce refroidissement en enrobant la génératrice dans un conduit et en installant dans celui-ci un grand ventilateur qui refroidit à l'air. Il y a cependant un petit nombre de constructeurs d'éoliennes qui utilisent des génératrices refroidies par eau. Ces génératrices peuvent être construites de façon plus compacte ce qui comporte quelques avantages au niveau du rendement électrique, mais elles requièrent en même temps l'installation d'un radiateur dans la nacelle afin de se débarrasser de la chaleur provenant du système de refroidissement par liquide



**Figure I.12 :** Alternateur d'éolienne, puissance 5'000 kW.

### I.5.2. Le mât (tour) :

Composé de trois parties vient se fixer sur la partie supérieure de la fondation revue à cet effet, en général, le mât est composé de trois parties permettant un transport plus simple. Il est fixé à la fondation par des boulons, partiellement serrés, permettant ainsi une certaine extension de la structure soumise en permanence à de nombreuses forces. Le mât sert également à protéger les immenses câbles électriques qui passent à l'intérieur, ainsi l'électricité produite est acheminée vers le réseau principal.[14]

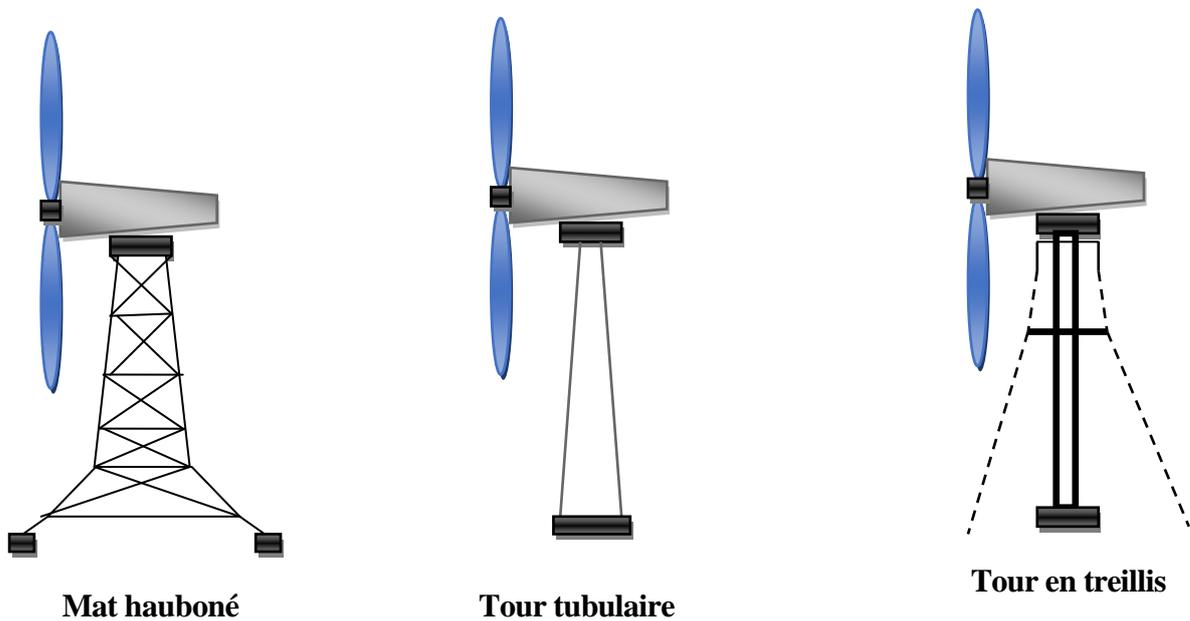


**Figure I.13 :** Pose de la première section du mât.

Trois grands types de tour existent, à savoir :

- **Tour mât haubané** de construction simple et moins coûteuse, elle s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
- **Tour en treillis** qui sont les moins chères sont souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.

- **Tour tubulaire** qui est beaucoup plus élégant, a un cout qui peut atteindre trois à quatre fois celui d'un pylône haubané.



**Figure I.14** : Différents types de tour.[15]

#### *1.5.2.1. Hauteur de tour l'éolienne :*

La hauteur de la tour est un paramètre dépendant du site car il est fonction des caractéristiques du vent qui est fonction du site. L'optimisation de conception pour le moindre coût pourrait favoriser les hautes tours dans les zones de vents faibles et les courtes tours dans les zones de vent fort. Cependant, s'il ya des obstacles comme les arbres ou les objets de grande taille qui peuvent rendre l'écoulement du vent plus turbulent, une plus haute tour sera nécessaire.

En outre, de hautes tours peuvent protéger la turbine de l'effet de cisaillement du vent si le site est souvent le siège d'un important taux de cisaillement du vent.

En général, plus grande est la tour, plus puissante est l'énergie produite par le système. Selon, la hauteur de la tour qui doit être d'au minimum de 20 m Plus favorable encore, la hauteur de la tour devrait être supérieure à 24 m pour éviter toute turbulence à proximité du sol.

Par rapport à la dimension du rotor, il est généralement de l'ordre de 1 à 1,5 fois le diamètre du rotor pour une turbine à axe horizontal en vent normale. Pour une éolienne de petite puissance, la hauteur du pylône par rapport au diamètre du rotor est beaucoup plus élevée afin de bénéficier de la vitesse du vent supérieure à une hauteur plus élevée. En effet, la demande de la plus haute tour est en train d'augmenter. Les défis qui viennent avec la conception de la plus haute tour sont pour la rendre structurellement sûre à un coût raisonnable en considérant les exigences imposées par l'assemblage et le transport de l'installation. La grande tour a besoin de grandes grues pour l'installation et il peut être difficile à les

transporter. L'utilisation de grues peut-être même impossible en fonction de l'emplacement d'installation. L'idée d'une tour à montage automatisé a été évaluée et a montré un certain potentiel pour résoudre ce problème pour de hautes tours.

Auto-tours ériger utilise des mécanismes tels que les mécanismes de télescopage, tour-dispositifs d'ascension, un cadre ou levage-up des systèmes.

### **I.5.3. La fondation :**

D'une éolienne occupent une surface comprise entre 200 et 300 m<sup>2</sup> sur une profondeur de plusieurs mètres. Il faut environ 60 tonnes d'acier pour le ferrailage et jusqu'à 600 m<sup>3</sup> de béton, soit environ 1400 tonnes. Sur cette fondation il faut ancrer solidement dans le béton la virole d'ancrage, cette pièce circulaire métallique hérissée de tiges filetées sur son pourtour sur lesquelles sera fixée la première section du mât de l'éolienne.



**Figure I.15 :** Les fondations de grande éolienne. [38]



rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV.

Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1%), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements.

Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers.

Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs.

### **I.7.1. Arrêt de l'éolienne :**

L'éolienne peut être arrêtée manuellement (interrupteur Marche/Arrêt) ou en actionnant le bouton d'arrêt d'urgence.

Le système de commande arrête l'éolienne en cas de fonctionnement perturbé, ou encore si les conditions de vent sont défavorables.

#### *I.7.1.1. Arrêt automatique :*

En mode automatique, les éoliennes sont freinées de façon aérodynamique par la seule inclinaison des pales. Les pales du rotor inclinées réduisent les forces aérodynamiques, freinant ainsi ce dernier. L'éolienne s'arrête également automatiquement en cas de dysfonctionnement ou en présence de certains événements. Certains dysfonctionnements entraînent une coupure rapide par les alimentations de secours des pales, d'autres pannes conduisent à un arrêt normal de l'éolienne. Selon le type de dysfonctionnements, l'éolienne peut redémarrer automatiquement.

### *1.7.1.2. Arrêt manuel :*

L'éolienne peut être arrêtée à l'aide de l'interrupteur Marche/Arrêt (armoire de commande). Le système de commande tourne alors les pales du rotor pour les décrocher du vent et l'éolienne ralentit puis s'arrête.

### *1.7.1.3. Arrêt manuel d'urgence :*

Si nécessaire, l'éolienne peut être stoppée immédiatement, en appuyant sur le bouton d'arrêt d'urgence (armoire de commande). Ce bouton déclenche un freinage d'urgence sur le rotor, avec une inclinaison rapide par l'intermédiaire des unités de réglage des pales et de freinage d'urgence. Le frein d'arrêt mécanique est actionné simultanément. L'alimentation électrique de tous les composants reste assurée.

Une fois l'urgence passée, le bouton d'arrêt d'urgence doit être réarmé pour permettre le redémarrage de l'éolienne.

### *1.7.1.4. Absence de vent :*

Si l'éolienne est en service, mais que l'absence de vent fait trop ralentir le rotor, l'éolienne passe en mode de fonctionnement au ralenti par l'inclinaison lente des pales du rotor dans une direction de 60°. L'éolienne reprend automatiquement son fonctionnement une fois que la vitesse de vent de démarrage est de nouveau atteinte. [17]

## **1.8. Pourquoi la plupart des éoliennes ont-elles trois pales ?**

La plupart des éoliennes sont des éoliennes tripales (3 pales orientables) à axe horizontal. Ce choix s'explique essentiellement par un compromis entre le rendement de l'éolienne, ses contraintes de fonctionnement et ses coûts de fabrication. Plus le nombre de pales est élevé, plus le couple transmis à l'arbre du rotor est grand et plus l'éolienne peut démarrer à une vitesse de vent faible. A contrario, chaque pale provoque des turbulences pour les autres, ce qui limite la vitesse de rotation de l'éolienne. Par ailleurs, un nombre de pales élevé entraîne une plus grande prise au vent qui interdit leur fonctionnement lorsque le vent est fort, augmente les nuisances sonores et les coûts de fabrication.

Dans le cas d'une éolienne bipale, la différence des forces qui s'appliquent entre la pale du haut et la pale du bas crée une torsion au niveau de l'axe du rotor car la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Il en résulte une usure plus rapide et la nécessité de mettre en place des mécanismes spécifiques (balancier du rotor).

Le meilleur compromis entre le rendement et la vitesse de démarrage de l'éolienne est ainsi souvent trouvé avec les éoliennes tripales.[18]



a) Éolienne mono pale

b) Éoliennes deux pales

**Figure I.17 :** Éolienne à axe horizontal deux pales et mono pal. [18]**I.9. Elles ne sont pas à l'abri d'un accident :**

Malgré toutes les précautions prises lors de la construction, des accidents peuvent se produire :

- un système de refroidissement défaillant dans la nacelle peut provoquer son incendie.
- des contraintes mécaniques trop importantes sur les pales peuvent les briser.
- le givrage des pales peut provoquer des projections de blocs de glace.
- des vents très violents peuvent renverser toute l'éolienne.



a) Incendie de la nacelle d'une éolienne le 14 janvier 2016 lors de travaux d'entretien



b) Pales brisées par un coup de vent en Le février 2016 à Dinéault, dans le Finistère. à Uedem, en Belgique.



c) En hiver, restez à bonne distance des éoliennes



d) Effondrement d'une éolienne sur une autoroute Allemande près de Bielefeld en 2017.

**Figure I.18 :** Accidents des éoliennes. [15]

**I.10. Conclusion :**

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

# Chapitre II

## Modélisation de la chaîne de conversion

## II. Modélisation de la chaîne de conversion

### II.1. Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

A fin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique sinon la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale.

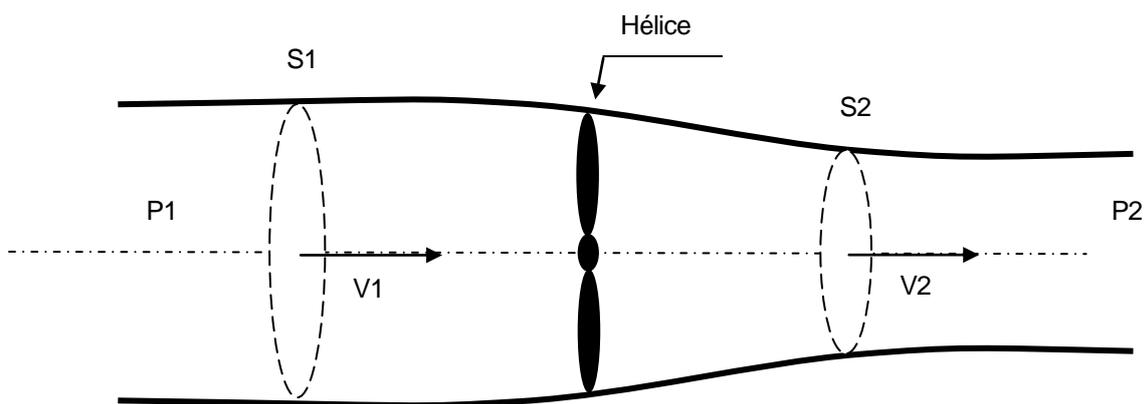
### II.2. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

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

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

#### II.2.1. Loi de BETZ :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (figure II.1) sur le quel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. [19]



**Figure II.1 :** Tube de courant d'air autour d'une éolienne. [19]

On peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \tag{II.1}$$

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho s (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par :

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2). \quad (\text{II.3})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aer} = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{II.4})$$

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit :

$$V = \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right) \quad (\text{II.5})$$

On obtient :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.6})$$

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 - V_2^3 - V_1 \cdot V_2 + V_1^2 \cdot V_2 \quad (\text{II.7})$$

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \left[ \left( 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^3 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 + \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \right) \right] \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{dP_{aer}}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \left[ -3V_2^2 - 2(V_1 \cdot V_2) + V_1^2 \right] = 0 \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{cases} (-3V_2 - V_1)(V_1 + V_2) = 0 & (\text{II.10}) \\ (V_1 + V_2) \neq 0 & (\text{II.11}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} (-3V_2 - V_1) = 0 \rightarrow V_2 = \left( \frac{1}{3} \right) V_1 \rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3} & (\text{II.12}) \end{cases}$$

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \left[ \left( 1 - \left( \frac{1}{3} \right)^3 - \left( \frac{1}{3} \right)^2 + \left( \frac{1}{3} \right) \right) \right] \quad (\text{II.13})$$

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot (0.5925) \quad (\text{II.14})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse soit à la vitesse, la puissance correspondante (mécanique théorique) serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{II.15})$$

Avec :

- $S$  la surface balayée par l'éolienne.

- $\rho$  la masse volumique de l'air ( $1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$ ).

- $V$  la vitesse du vent.

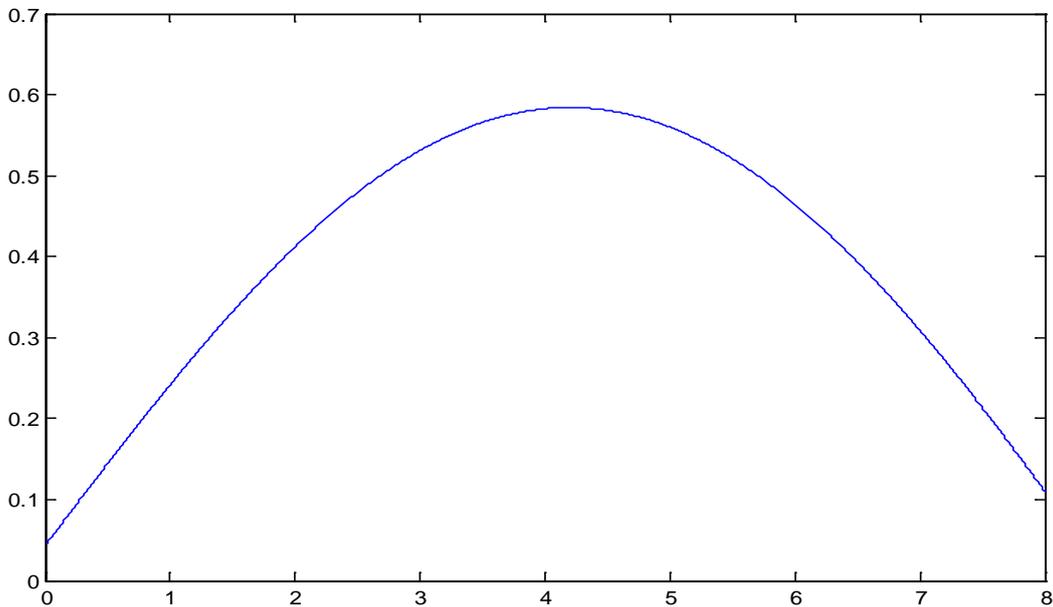
On définit le rapport entre les deux puissances  $C_p$ , puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible par le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aer}}{P_{mt}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \right) * \left( 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) \quad (\text{II.16})$$

$$P_{aer} = P_{mt} \cdot C_p \quad (\text{II.17})$$

$$P_{aer} = 0.5925 \cdot P_{mt} \quad (\text{II.18})$$

Ce coefficient présente un maximum de 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de BETZ qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.



**Figure II.2 :** Variations du coefficient de puissance.

## II.2.2. Valeurs pratiques du coefficient de puissance en fonction du type de turbine :

Afin de pouvoir permettre une utilisation pratique du coefficient de puissance  $C_p$ , nous introduisons la variable  $\lambda$  appelée vitesse relative et définie par la relation suivante :

$$\lambda = \Omega_{tur} \left( \frac{R}{V} \right) = \frac{2\pi NR}{60V} = \frac{R \cdot \omega}{V} \quad (II.19)$$

Où :

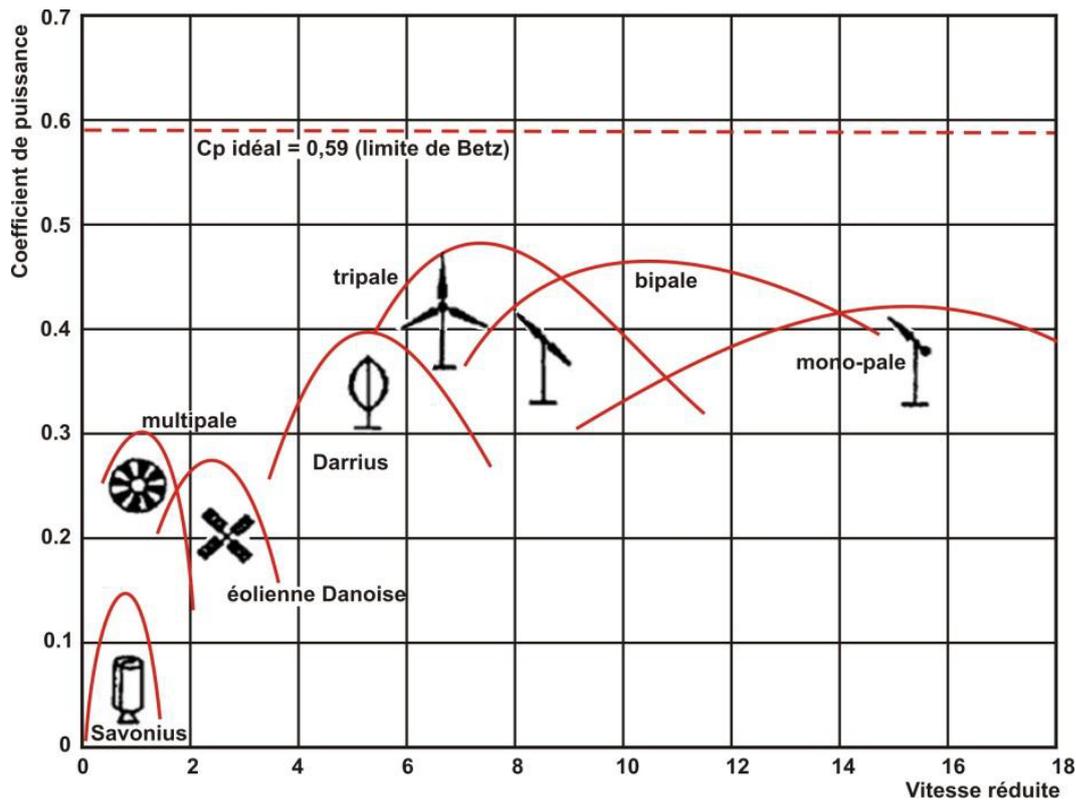
$\Omega_{tur}$  : Vitesse angulaire mécanique de la turbine ( $rad/s$ ).

$V$  : Vitesse du vent ( $m/s$ ).

$R$  : Rayon de la turbine ou longueur de pale en (m).

$N$  : vitesse de rotation de rotor [tr/min].

Pour chaque type d'éolienne, il existe une courbe  $C_p = F(\lambda)$  exprimant la relation entre  $C_p$  et les paramètres  $R$ ,  $\Omega_{tur}$  et  $V$  telle que nous le montre la (Figure II.3) Pour chacune des courbes présentées, le coefficient de puissance atteint une valeur maximale.[20]



**Figure II.3 :** Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite  $\lambda$  pour différents types de turbines.

On remarque en tout premier lieu que les éoliennes à axe horizontal, dites à vitesse rapide, possèdent potentiellement un rendement plus important que les autres formules. Ceci explique leur domination dans le marché des machines actuelles, où la courbe du coefficient de puissance atteint son maximum pour une gamme de  $\lambda$  comprise entre 5 et 15.

Dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse réduite. Il atteint un maximum pour une certaine valeur de  $\lambda$  puis diminue même avec une augmentation de la vitesse réduite. Ces variations de  $C_p(\lambda)$ , restent bien en dessous de la limite de Betz.

Elles dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées.

On remarque aussi que pour une éolienne tripale, le coefficient de puissance est maximal ( $C_{p \max}$ ) pour une valeur de  $\lambda$  dite optimale ( $\lambda_{opt}$ ), pour  $\lambda = 7$ , c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse réduite que l'on maximise le rendement aérodynamique. Il est à noter aussi, qu'à diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation bien plus élevée qu'une tripale. [20]

### II.2.3. La force effective dans le rotor (F) :

$$F = \frac{1}{2} (\rho \cdot S \cdot V_1^2) \quad (II.20)$$

### II.2.4. Le couple théorique $C_{théo}$ :

$$C_{théo} = F * R = \frac{1}{2} (\rho \cdot S \cdot V_1^2) \cdot R \quad (II.21)$$

### II.2.5. Coefficient de couple $C_{couple}$ :

$$C_{couple} = \frac{C_{turbine}}{C_{théorique}} \quad (II.22)$$

$$C_{couple} = \frac{2 \cdot C_{turbine}}{\rho \cdot S \cdot R \cdot V_1^2} \quad (II.23)$$

### II.2.6. La relation entre $C_p$ et $\lambda$ :

$$\frac{C_p}{C_{couple}} = \frac{2P_{aer}}{\rho S V^3} * \frac{\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot R}{V \cdot C_{tur}} = \frac{P_{aer} \cdot R}{V \cdot C_{tur}} = \frac{C_{tur} \cdot \omega \cdot R}{V \cdot C_{tur}} = \frac{\omega \cdot R}{V} = \frac{\Omega_{tur} \cdot R}{V} = \lambda \quad (II.24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{aer} = C_{tur} \cdot \omega \quad (II.25) \\ \omega = \frac{2\pi N}{60} [rad / s] \quad (II.26) \end{array} \right.$$

- ✓ La vitesse relative  $\lambda$  est le rapport entre le coefficient de puissance  $C_p$  et le coefficient de couple du rotor  $C_{couple}$ .

On comprend tout l'intérêt des petites machines. Ainsi, et pour des  $\lambda$  très faibles, elles possèdent intrinsèquement un couple très important. Dans ce cas, la présence d'un nombre important de pale contribue à la création du couple de démarrage et ce, avec très peu de vent.

Par contre, dès que le vent se renforce, leurs caractéristiques de couple et de puissance s'effondrent rapidement.

### II.2.7. Le couple aérodynamique $C_{aer}$ :

$$P_{aer} = C_{aer} \cdot \Omega_{tur} \quad (II.27)$$

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{tur}} = \frac{1}{2(\rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_p)} \cdot \frac{1}{\Omega_{tur}} \quad (II.28)$$

### II.3. Classification des éoliennes selon leur vitesse :

Il y a deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.[21]

- Concernant les éoliennes à vitesse fixe : Elles sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est directement couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice. Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des machines asynchrones à cage d'écureuil peuvent se résumer dans les points suivants : [22]
  - ✓ Système électrique simple.
  - ✓ Grande fiabilité.
  - ✓ Prix modéré.

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
  - ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau électrique d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée.
- **Concernant les éoliennes à vitesse variable :**

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales. De plus, il limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite

du vent.[23] Mais dans ce cas, l'utilisation de convertisseur à base d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est nécessaire. Cette dernière est généralement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.[24]

Parmi les avantages de cette configuration nous avons :[25]

- L'augmentation du rendement énergétique.
- La réduction des oscillations de couple (Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques).
- La génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

### **II.3.1. L'angle d'inclinaison ( $\beta$ ) :**

L'angle d'inclinaison ou de calage permet de faire varier directement le coefficient de puissance d'une turbine. Il peut être utilisé efficacement pour le contrôle de la puissance de sortie du rotor. La réduction mécanique de la puissance du rotor peut être réalisée en réduisant ou minimisant l'angle d'attaque au-dessus de sa valeur critique. En limitant le coefficient de puissance, la puissance extraite à partir du vent est limitée. Ce type de commande de puissance est également connu en tant que commande de l'angle de calage (pitch control). Cette commande peut être utilisée pour atteindre différent objectif :

- Optimisation de la puissance de l'éolienne, en maximisant la puissance mécanique de sortie pour une vitesse de vent donnée, ce qui est généralement appliqué pour des vitesses faibles et modérées du vent, tout en étant inférieur à sa vitesse nominale.
- Prévenir l'excès de puissance mécanique de sortie pour les vents forts au-dessus des vitesses du vent limité. Cela permet de maintenir un contrôle de la puissance mécanique et la maintient au-dessous de la valeur nominale dans le cas des vents forts.
- Pour prévenir le mouvement (rotation) des pales dans le cas de turbines déconnectées.

Il y a deux façons communes dans les quelles le contrôle de l'angle de calage peut être utilisé pour la régulation de la puissance de sortie d'éolienne. [26]

#### **1/Commande actif de l'angle de calage :**

Pour des vitesses variables d'une éolienne, le fonctionnement d'une turbine ainsi que sa puissance de sortie peuvent être affectés soit par des changements de vitesse ou de variation de l'angle de calage des pales. Dessous de la puissance nominale, ces machines fonctionnent à la vitesse variable d'optimiser la vitesse relative au niveau de l'angle de calage fixe. Après la puissance nominale de sortie est obtenu un contrôle de couple de générateur est utilisé

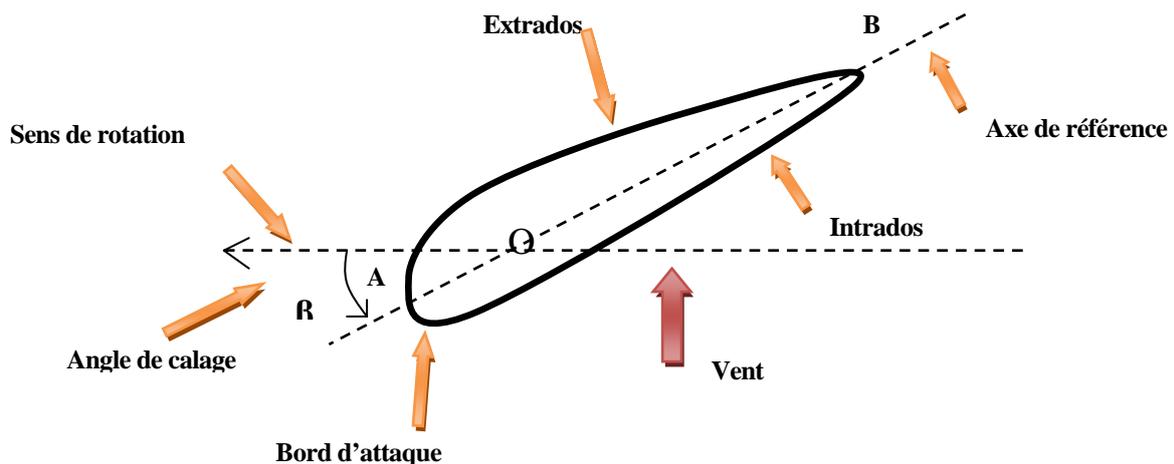
pour maintenir la puissance de sortie, tout en hauteur contrôlé est utilisé pour maintenir la vitesse du rotor. A des vitesses de vent élevées, la puissance de sortie du générateur peut être maintenue constante, avec une augmentation de la vitesse du rotor. Cette augmentation de l'énergie disponible dans le vent est stockée sous forme d'énergie cinétique dans le rotor. Il en résulte à la fois la réduction d'un couple aérodynamique et d'accélération du rotor.

Si la vitesse du vent continue à rester élevée, l'efficacité aérodynamique du rotor peut être réduite en modifiant l'angle de calage, ce qui réduit la vitesse du rotor.

## 2/Commande passif de l'angle de calage :

En cas de contrôle passif la vitesse du vent est utilisée pour fournir la puissance d'actionnement, ce qui permet d'ajuster l'angle des pas des pales. Dans ces modèles d'éoliennes, les effets des changements dans la vitesse du rotor ou la vitesse du vent sont liés aux changements de l'angle d'inclinaison des pales.

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la (Figure II.4).



**Figure II.4 :** Eléments caractéristiques d'une pale. [27]

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Corde : longueur  $l$  du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage  $\beta$  (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).
- Extrados : dessus des pales.
- Intrados : dessous des pales.

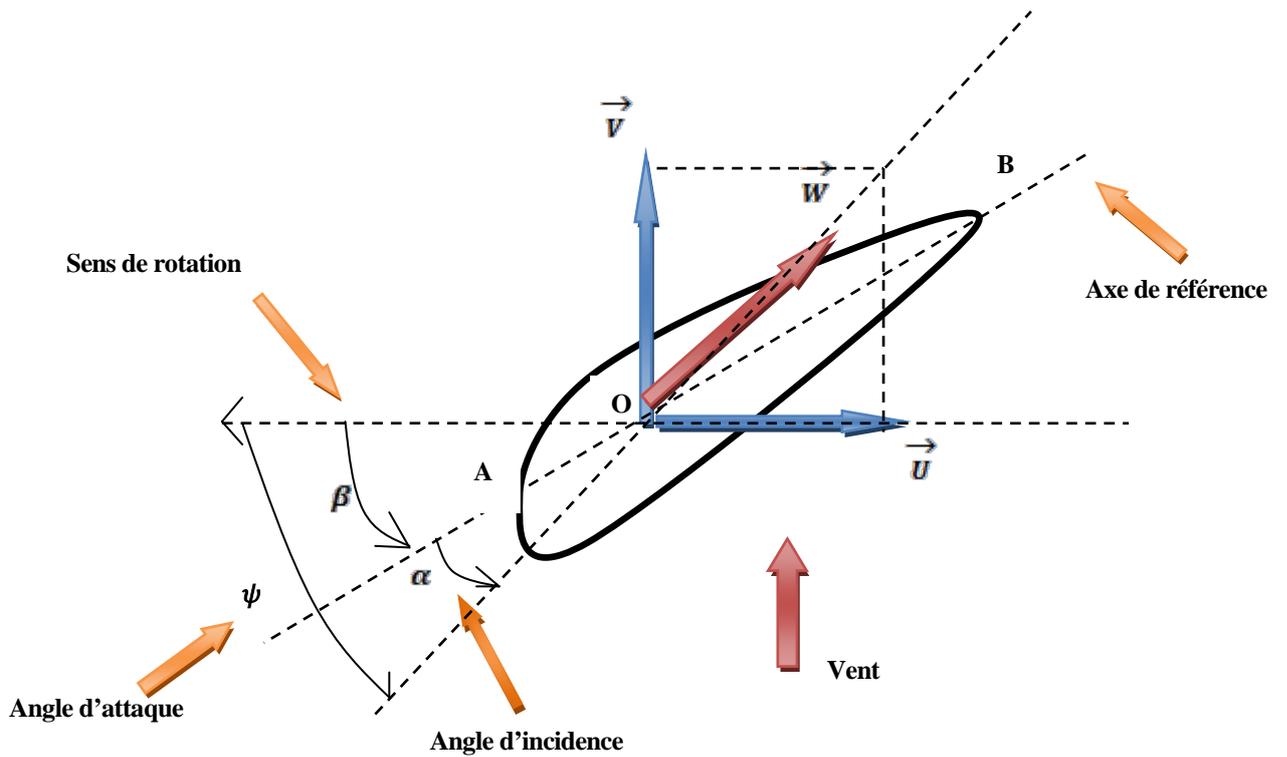


Figure II.5 : Directions du vent sur un tronçon de pale.

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis.

**II.3.1.1. Effort sur une pale d'éolienne :**

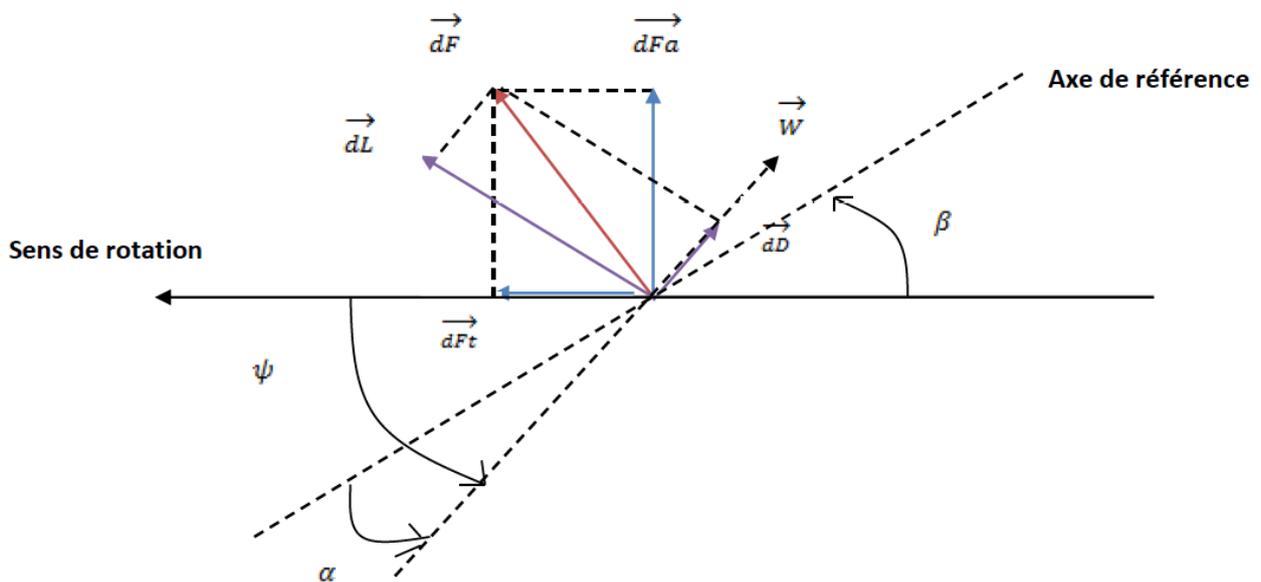


Figure II.6 : Forces appliquées sur un tronçon de pale. [28]

On peut décomposer la force résultante  $d\mathbf{f}$  de la manière suivante :

- La portance  $d\mathbf{L}$ , normale à la direction du vent apparent.
- La force de traînée  $d\mathbf{D}$ , parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- La poussée axiale  $d\mathbf{F}_a$ , perpendiculaire au plan de rotation.
- La poussée tangentielle  $d\mathbf{F}_t$ , dans la direction de rotation.

### II.3.2. Relation du coefficient de puissance avec l'angle de calage et la vitesse relative :

Dans la partie précédente, nous avons fait état d'une courbe  $C_p=f(\lambda)$  propre à chaque type d'éolienne. Pour permettre de faire varier  $C_p$ , agir sur la variable  $\lambda$  (la vitesse relative) n'est pas le seul moyen. En effet, les pales peuvent être pourvues de dispositifs actifs ou passifs afin de pouvoir dégrader le coefficient de puissance  $C_p$ . Il est ainsi possible de réguler la puissance mais aussi d'empêcher l'emballement du rotor pour de fortes vitesses de vent (en complément du frein de sécurité).

En s'inspirant des travaux de S. El Aïmani, il est possible de donner une expression approchée de l'équation  $C_p = F(\beta, \lambda)$  pour une éolienne de 1,5 MW :

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.3 - 0.00167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{(10 - 0.3\beta)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{II.29})$$

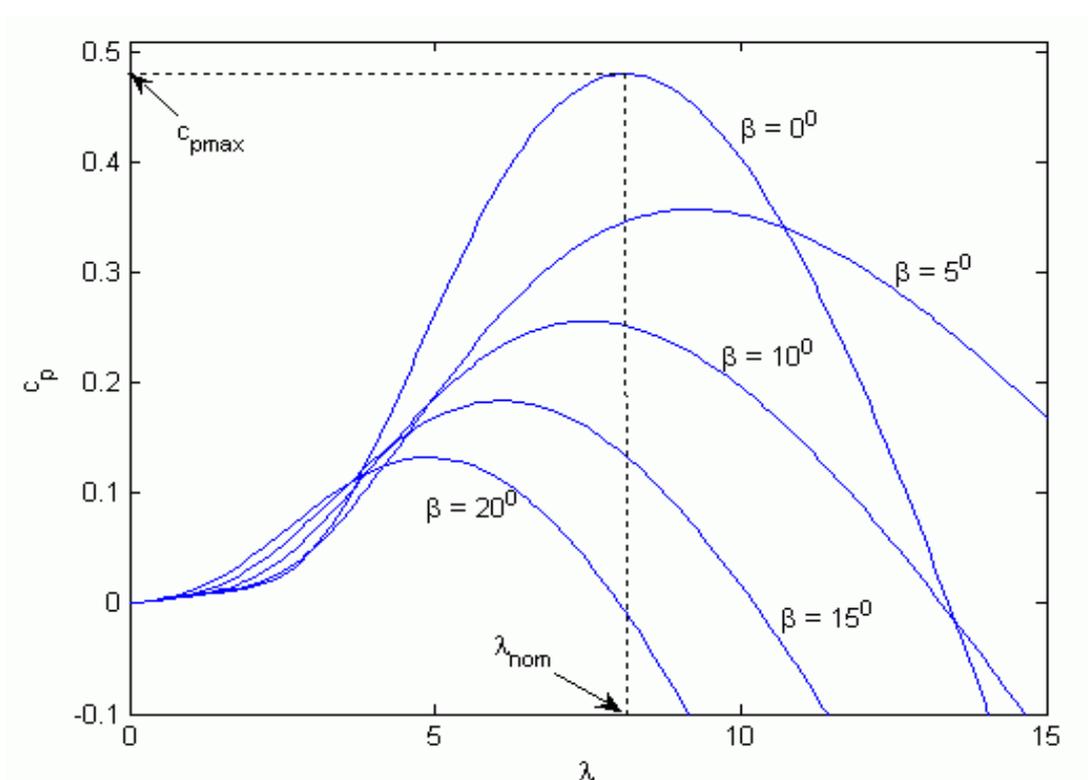


Figure II.7 : Caractéristiques  $C_p=f(\lambda)$  pour cinq valeurs de  $\beta$ .

La figure II.7 représente le coefficient de puissance  $C_p$  (calculé à partir de l'équation  $CP(\lambda, \beta)$ ) en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour différents angles d'inclinaison des pales  $\beta$ . On remarque que si, pour un angle constant  $\beta$ , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse  $\lambda$  constant et égal à  $\lambda$  optimal à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure II.7 montre le  $\lambda$  optimal correspondant à un angle d'inclinaison des pales  $\beta$ .

Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir  $\lambda = \lambda$  optimal, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent (équation II.8).

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

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% [25]

#### II.4. Modèle de la turbine d'éolienne :

La turbine éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique. [29]

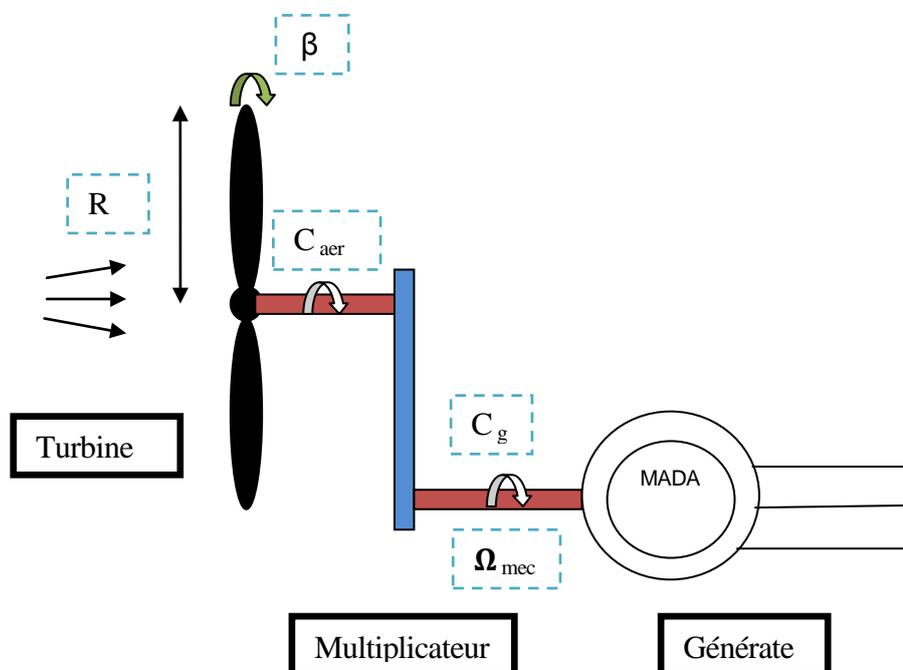


Figure II.8 : Schéma modèle de turbine.

### II.4.1. L'équation dynamique de la turbine :

Ce qui doit être modélisé c'est la transmission du couple et de la puissance captée par le rotor éolien. Le train de transmission de puissance est constitué des pales reliées au moyeu, couplées à l'arbre lent, relié à son tour au multiplicateur qui multiplie la vitesse de rotation de l'arbre rapide qui est couplé à son tour à la génératrice. [27]

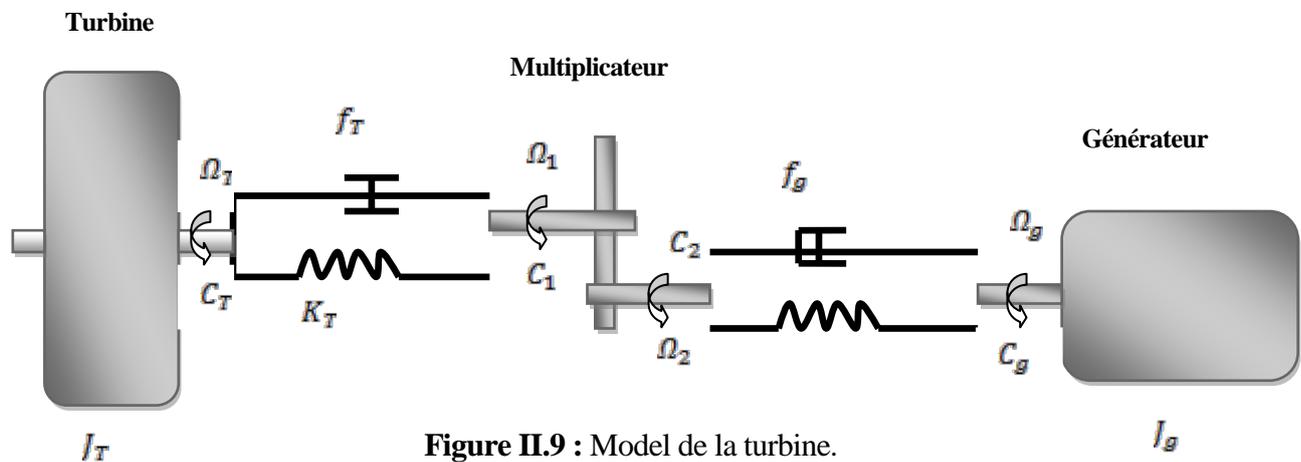


Figure II.9 : Model de la turbine.

Le modèle à trois masses équivalent de la chaîne de conversion éolienne est présenté sur la Figure II.9. Les masses correspondent à une grande masse du rotor de la turbine éolienne (90% du moment d'inertie global), masse pour le multiplicateur (2 à 4%), et une masse (6 à 8%) pour le générateur respectivement. En tenant compte des coefficients d'élasticité et de frottement pour les deux arbres ce qui nous permet de poser les hypothèses simplificatrices suivantes.[30][31]

### II.4.2. Hypothèses simplificatrices :

- La turbine comprend trois pales de longueur  $RT$  chaque une, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'une inertie  $JT$ .
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à  $G$  ou un gain de couple égale à  $1/G$ .
- Les arbres de transmission sont parfaitement rigides. Ces hypothèses nous permettent de considérer le modèle simplifié à deux masses suivant:

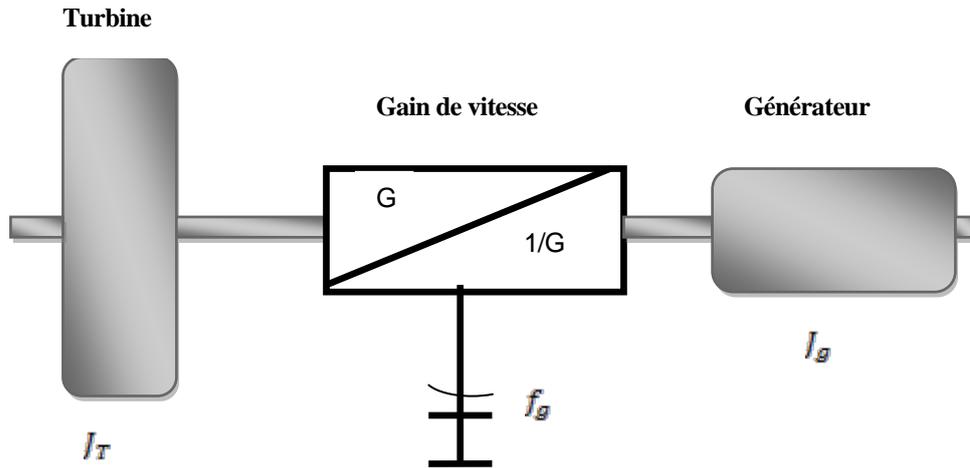


Figure II.10 : Modèle simplifié de la turbine.

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left( \frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \cdot \left( \frac{d\Omega_g}{dt} \right) + \left( \frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$C_T, C_g$ : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

$J_T, J_g$ : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

$f_T, f_g$  : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

$G$ : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

$\Omega_g$  : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \quad (\text{II.32})$$

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f \quad (\text{II.33})$$

D'où, l'équation mécanique devienne :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g \quad (\text{II.34})$$

### II.5. Modèle du multiplicateur :

La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (*tr/mn*). Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (*tr/mn*).

$$\Omega_{mec} = G\Omega_{tur} \quad (\text{II.35})$$

Où :

$\Omega_{mec}$  : est la vitesse angulaire de rotation de la génératrice (*rad / s*) ou (*tr/mn*).

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{aer} \tag{II.36}$$

Où :

$G$  : rapport de multiplication.

$C_{mec}$  : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N. m).

### II.6. Modèle de l'arbre :

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante :

$$J_T = \left( \frac{\partial \Omega_{mec}}{\partial t} \right) = \Sigma C = C_T + C_{vis} \tag{II.37}$$

Le couple de frottement visqueux est modélisé par :

$$C_{vis} = f_T \cdot \Omega_{mec} \tag{II.38}$$

Où :

$J_T$  : Inertie totale des parties tournantes (kg.m<sup>2</sup>).

$f_T$  : Coefficient de frottements visqueux total.

Le couple total de l'éolienne est donné par :

$$C_T = C_{mec} + C_{em} \tag{II.39}$$

$C_{em}$  : Couple électromagnétique de la MADA (positif : car c'est un couple entraînant).

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$J_T = \left( \frac{J_{tur}}{G^2} \right) + J_g \tag{II.40}$$

La Figure (II.11) montre le synoptique global du modèle de l'éolienne.

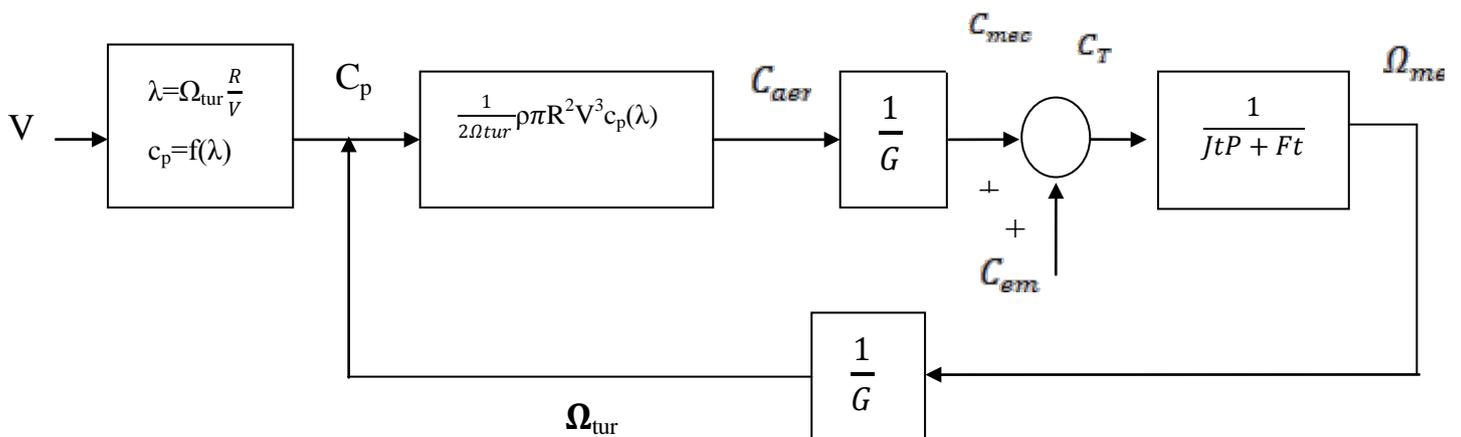


Figure II.11 : schéma bloc d'une turbine éolienne.

**II.7. Conclusion :**

Nous avons détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil du vent et des pales utilisées et l'angle de calage. Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable) sont également décrites. Nous avons pu valider le modèle de notre turbine, ce qui nous permettra de l'utiliser par la suite.

# Chapitre III

## Modélisation de la MSAP

### III. Modélisation de la MSAP

#### III.1 Introduction :

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entraînés par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW.

Dans notre étude nous allons nous intéresser à une éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents. Ce choix n'est pas fortuit puisqu'il est basé sur les avantages technologiques et économiques qu'offre la MSAP comparée aux autres machines.

L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le coût élevé des aimants.

Le progrès technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a également conduit vers un progrès important dans les performances globales des entraînements à vitesse variable, ce qui facilite l'autopilotage de la machine synchrone la rendant ainsi très performante comparée à la machine asynchrone et celle à courant continu.

Mais l'avantage le plus important de ces machines dans le domaine éolien est l'absence de multiplicateur de vitesse pour des machines de grand nombre de paires de pôles, réduisant ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système.

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices afin d'obtenir un modèle simple et fiable pour la simulation numérique.

#### III.2. Les machines électriques dans les aérogénérateurs :

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les Machines synchrones et asynchrones.

##### III.2.1. Machine synchrone :

###### III.2.1.1. Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) :

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes elle est simple et présente un bon rendement. Et nécessite pas une source d'alimentation pour le circuit d'excitation.

Dans plusieurs éoliennes de petite taille, les aimants tournent autour du stator alors situé au Centre de la machine. Il est possible d'immobiliser le rotor en présence de vents modérés de façon à réaliser la maintenance de la turbine.[32][33]

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue Construction mécanique :

- Les machines synchrones à aimants permanents montés en surface.
- Les machines synchrones à aimants permanents insérés.
- Les machines synchrones à aimants permanents chapeautés.
- Les machines synchrones à aimants permanents enterrés.

### **III.2.1.2. Les domaines d'application de MSAP :**

Maintenant on présente des exemples d'application des MSAP utilisées dans différentes plages de puissance.

#### **1/Applications aux petites puissances ( $P < 600W$ ) :**

- Micro Ventilateur.
- Disque Dur
- Fraise de dentiste
- Programmeur Mécanique

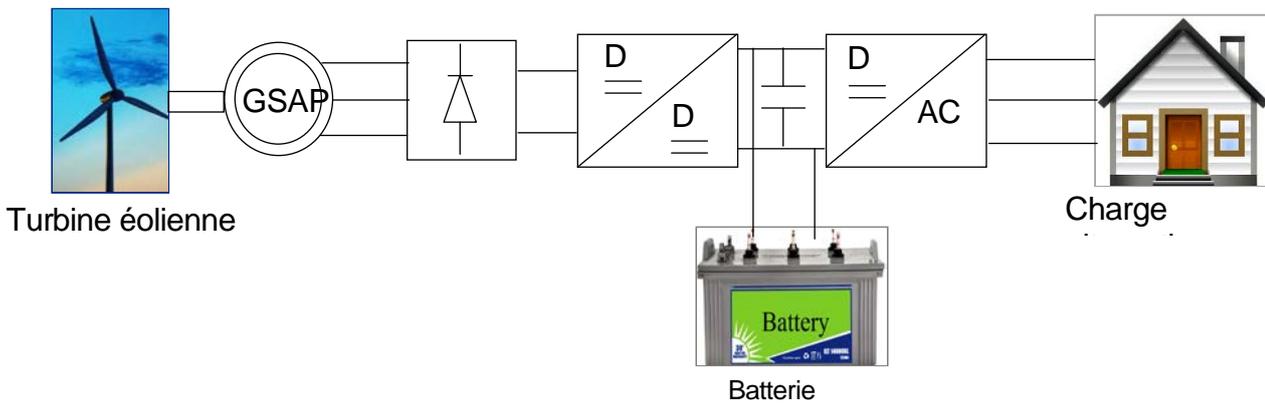
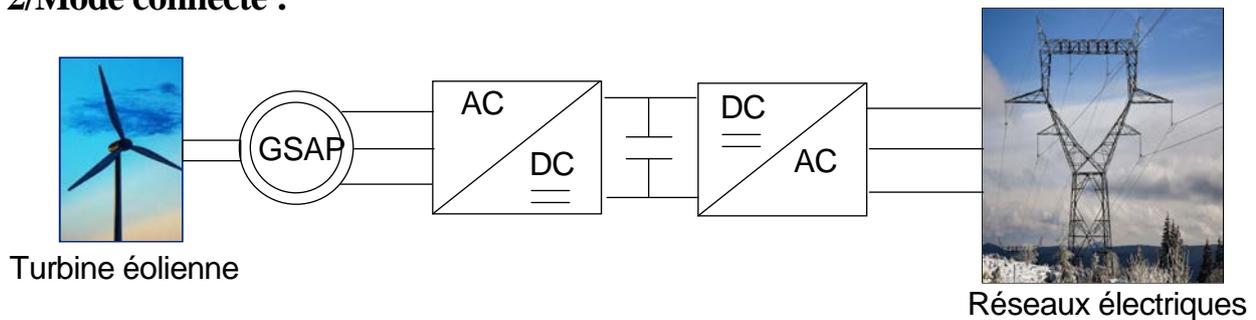
#### **2/Applications aux moyennes puissances ( $500W < P < 100kW$ ) :**

- Vélo à assistance.
- Voiture électrique (Toyota Prius).
- Machine-outil.
- Robot industrie.

#### **3/Applications aux fortes puissances :**

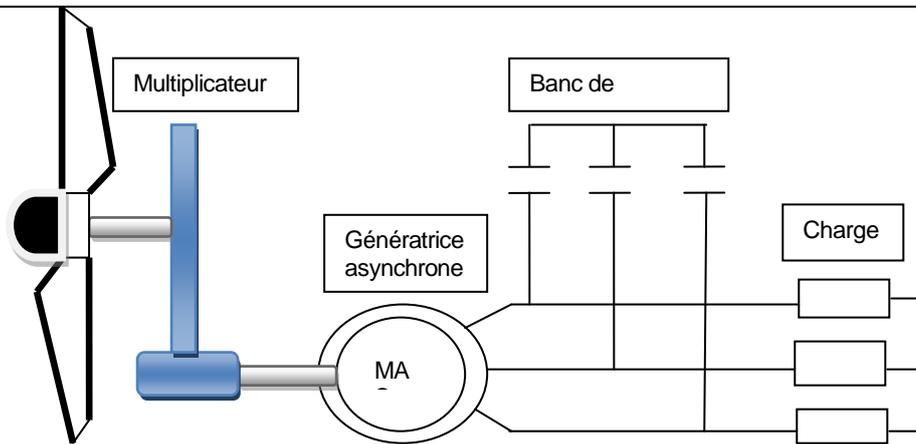
- Traction ferroviaire
- Propulsion navale.

### **III.2.1.3. Les modes d'utilisation :**

**1/Mode isolé :****Figure III.1:** Mode isolé.**2/Mode connecté :****Figure III.2 :** Mode connecté au réseau.**III.2.2. Machines asynchrones :****III.2.2.1. Machines asynchrones à cage d'écureuil :**

La machine asynchrone à cage reste sans conteste celle qui est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée elle a l'avantage d'être standardisé, fabriqué en grande quantité et dans une grande échelle de puissance, elle aussi la moins exigeante en termes d'entretien. [34]

Cette dernière fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation donc elle est souvent associée à une batterie de condensateurs de compensation. [35]



**Figure III.3 :** Machines asynchrones à cage d'écureuil.

### III.2.2.2. Machines asynchrones a doublé alimentation (MADA) :

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté a tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau a travers un convertisseur de fréquence, si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence peut être réduit. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles sont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de systèmes a bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement a vitesse variable un avantage suffisant.[34]

### III.2.3. Les avantages et les inconvénients des machines électriques dans les aérogénérateurs :

	Avantages	Inconvénients
M. asynchrone (à cage)	Faible cout	Puissance extraite non optimisée
	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fiabilité de l'électronique de puissance	Pas de contrôle de l'énergie réactive
		Magnétisation de la machine imposée par le réseau
M. asynchrone (MADA)	Machine robuste	Maintenance de biote de vitesse
	Fonctionnement à vitesse variable	Prix de l'électronique de puissance
	Puissance extraite optimisée	Contrôle commande complexe
	Machine standard	Contact glissant bague balais
Machine synchrone (MSAP)	Très bon rendement	Cout élevé (à cause du prix des aimants)
	Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse	Prix de l'électronique de puissance beaucoup plus chaire
	Puissance extraite optimisée pour les vents faibles	Moins robuste

**Tableau III.1:** les avantages et les inconvénients de la machine synchrone et asynchrone.[36]

### III.3. Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) :

#### III.3.1. Principe de fonctionnement de la MSAP :

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

- Le stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [MAH12].
- Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique.

Il existe deux types de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors à pôles lisses et les rotors à pôles saillants.[37]

### **III.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :**

Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, l'établissement de son modèle mathématique sera développé sur la base de quelques hypothèses simplificatrices.

- Le stator est connecté en étoile, avec neutre en l'air pour annuler la composante homopolaire du courant.
- La saturation est négligée.
- La distribution de la F.m.m dans l'entrefer est sinusoïdale.
- Les amortisseurs sont modélisés par deux enroulements en court-circuit, disposé l'un sur l'axe direct et l'autre sur l'axe en quadrature.
- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis dans le fer sont négligeables.
- Les résistances sont invariables avec la température.

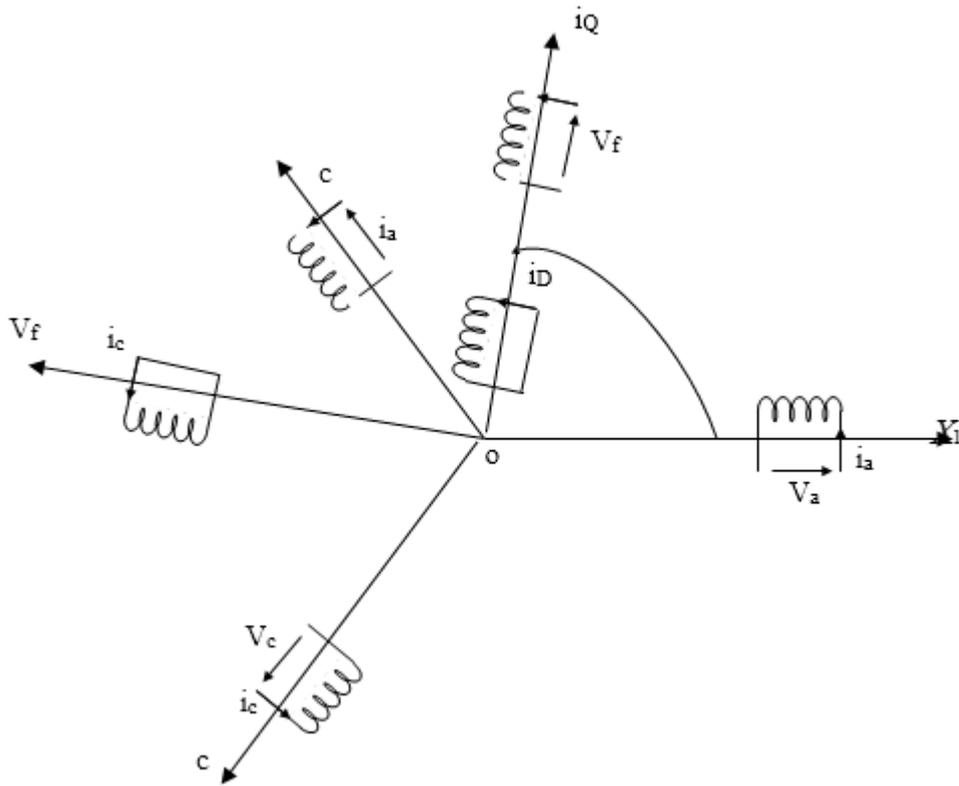
#### **III.4.1. Les hypothèses simplificatrices :**

Pour une représentation plus simple nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Caractéristique magnétique de la machine linéaire.
- Symétrie de la machine.
- Alimentation par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.
- L'influence des pièces polaires.

#### **III.4.2. Equations de la machine :**

Dans notre cas, la machine utilisée est une machine synchrone à aimants permanents à pôle lisse sans pièces polaires. La description est représentée dans l'espace électrique par la figure (I.3)



**Figure III.4** Représentation de la machine synchrone à aimants permanents dans L'espace électrique

Les équations électriques dans le cas général d'une machine synchrone à aimants permanents triphasée sont les suivantes :

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\phi] \tag{III.1}$$

$$[\phi] = [L(\theta)][I] \tag{III.2}$$

Avec:

$$[V] = (V_a, V_b, V_c, V_f, 0, 0)^t$$

$$[I] = (I_a, I_b, I_c, I_f, I_D, I_Q)^t$$

$$[\phi] = (\phi_a, \phi_b, \phi_c, \phi_f, \phi_D, \phi_Q)^t$$

En remplaçant l'équation (I.2) dans (I.1), cette dernière devient :

$$[V] = [R][I] + [L(\theta)]\frac{d}{dt}[I] + \omega[I]\frac{d}{d\theta}[L(\theta)] \tag{III.3}$$

Avec:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

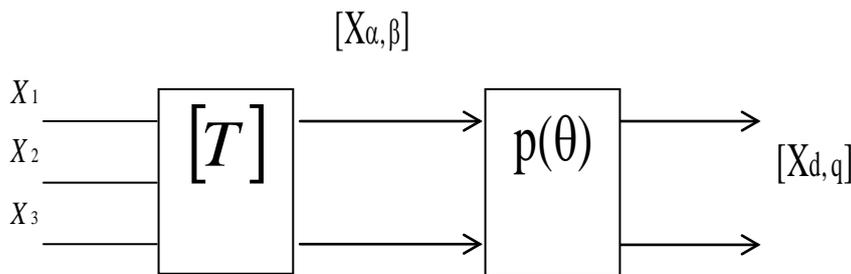
A partir de l'équation (I.3) on peut écrire:

$$\frac{d}{dt}[I] = [L(\theta)]^{-1} \left\{ [V] - \left( [R] + \omega \frac{d}{d\theta} [L(\theta)] \right) [I] \right\} \quad (\text{III.4})$$

Le système est non linéaire, la principale difficulté pour résolution de cette équation est le calcul de la matrice inverse  $[L(\theta)]^{-1}$ , ou il faut refaire cette inversion à chaque pas de simulation, ce qui augmenterait considérablement le temps de calcul pour remédier à cette difficulté, nous utiliserons la transformation de Park.

### III.4.3. Transformation de Park :

Afin de supprimer la non linéarité existante entre les différentes équations et afin de pouvoir travailler avec des grandeurs constantes, on effectue un changement de variables qui consiste à transformer les trois enroulements de phases du système réel (a,b,c) en enroulements orthogonaux d'axes (d,q) suivant le schéma représenté par la figure(III.5).



**Figure III.5:** Passage des composantes triphasées aux composantes de Park.

Le passage d'un système triphasé  $X_{1,2,3}$  a un système diphasé  $X_{\alpha,\beta}$ . S'appelle transformation de Concordia est définie par :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Donc:

$$[X_{1,2,3}] = [T] [X_{\alpha,\beta}] \quad (\text{III.6})$$

Le passage aux composantes de PARK est donné par la relation suivante :

$$[X_{\alpha,\beta}] = [P(\theta)][X_{d,q}] \tag{III.7}$$

Avec :

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \tag{III.8}$$

Les composantes triphasées sont liées aux composantes de PARK par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \tag{III.9}$$

### III.5. Modélisation de la machine synchrone a aimant permanents dans le repère de Park lié au rotor :

La machine synchrone à aimants permanents peut être représenté dans le cas général par un inducteur alimenté par une source de courant parfaite comme le montre la figure (III.3).

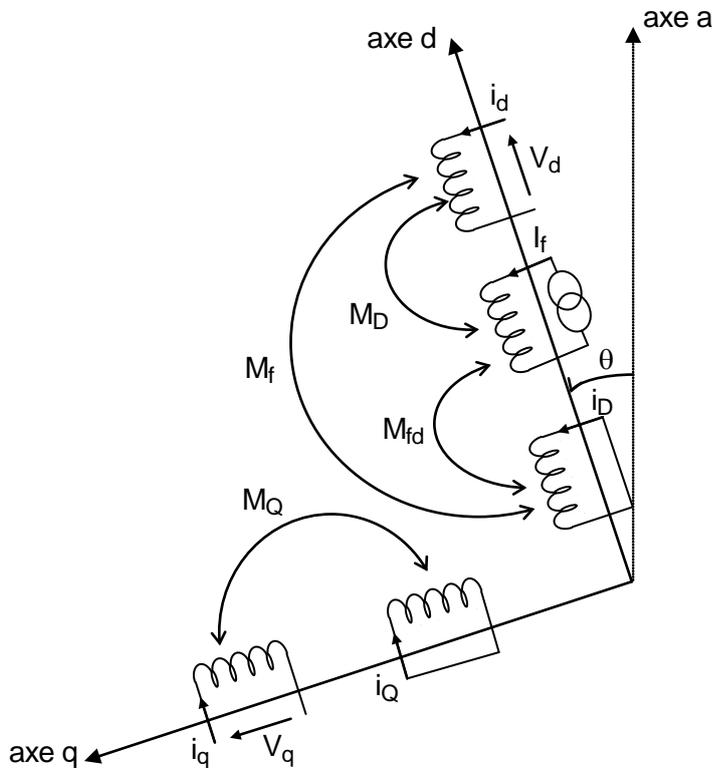


Figure III.6: Schéma équivalent de la machine synchrone dans le repère d-q.

### III.5.1 Equation de la MSAP dans le repère d, q lié au rotor :

Les vecteurs  $[V_{a,b,c}]$ ,  $[\Phi_{a,b,c}]$  et  $[I_{a,b,c}]$  sont remplacés par leurs expressions en fonction des vecteurs  $[V_{d,q}]$ ,  $[\Phi_{d,q}]$  et  $[I_{d,q}]$ .

$$[V_{a,b,c}]^t = [T][p(\theta)][V_{d,q}]^t$$

$$[I_{a,b,c}]^t = [T][p(\theta)][I_{d,q}]^t$$

$$[\Phi_{a,b,c}]^t = [T][p(\theta)][\Phi_{d,q}]^t$$

En rapportant ces transformations dans le système d'équations suivant :

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\phi]$$

On obtient :

L'équation donnant le couple électromagnétique en fonction de la vitesse  $\omega$  est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L_d S & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + L_q S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (\text{III.11})$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$\begin{aligned} C_{em} &= p[\Phi_d I_q - \Phi_q I_d] \\ &= p[(L_d - L_q)I_d I_q + \Phi_F I_q] \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

Pour une machine synchrone à aimants permanents à pôle lisse ( $L_d = L_q$ )

$$C_{em} = p \Phi_F I_q = K_T I_q \quad (\text{III.13})$$

Où :

$K_T$  est le coefficient associé à l'aimant.

### III.6. Convertisseur statique :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc.

Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

Continu  $\Longrightarrow$  Continu (Hacheur).

Continu  $\Longrightarrow$  Alternatif (Onduleur).

Alternatif  $\Longrightarrow$  Alternatif (Gradateur).

Alternatif  $\Longrightarrow$  Continu (Redresseur).

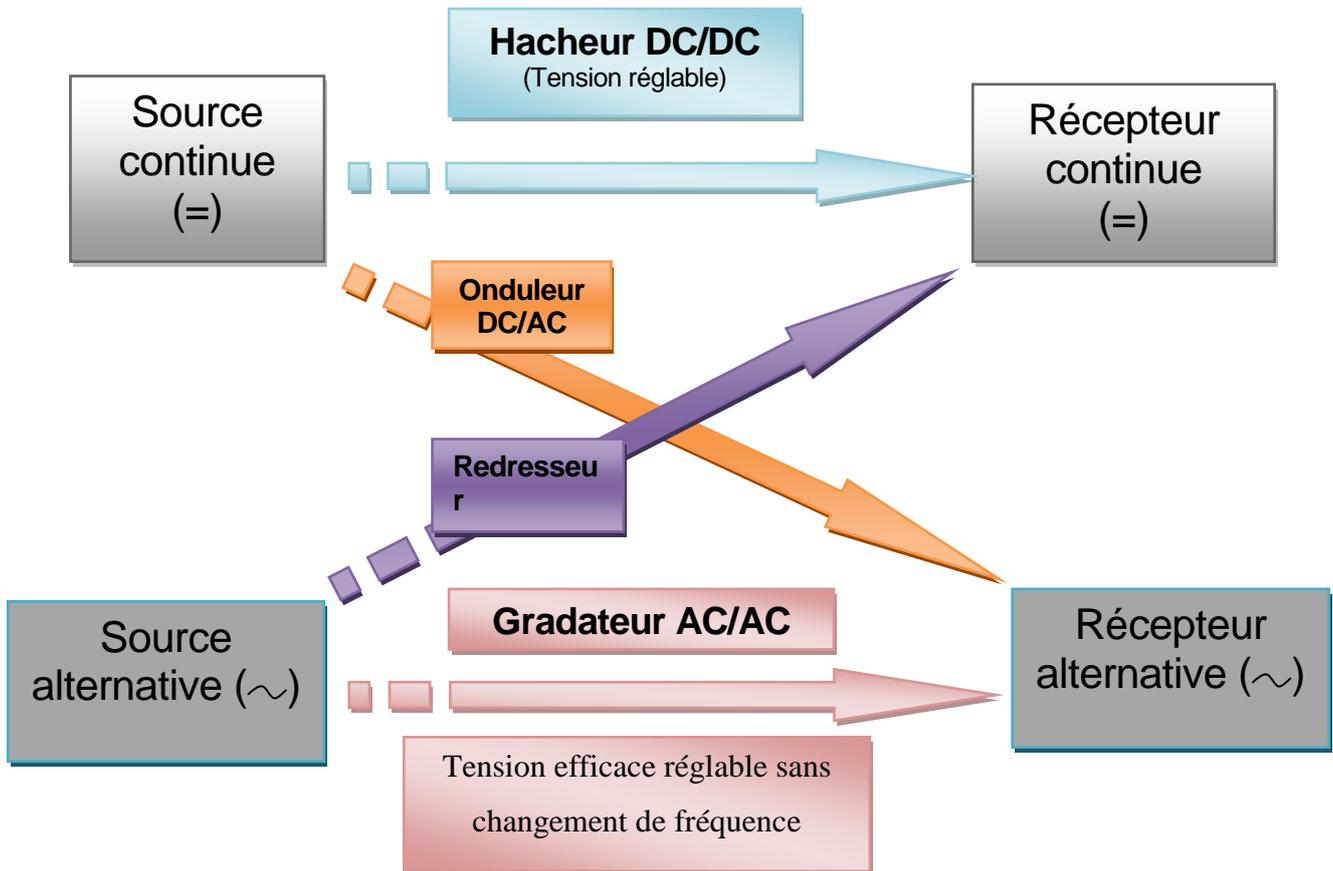


Figure III.7: famille de convertisseur statique.

### III.6.1. Hacheur (DC/DC) :

Le hacheur, ou convertisseur continu-continu, est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Il existe différents types de hacheurs :

- ✓ Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit **dévolteur**, **abaisseur** ou **Buck**.
- ✓ Dans le cas contraire, il est dit **survolteur** (**élevateur** ou **Boost**).
- ✓ Il existe aussi des hacheurs capables de travailler des deux manières (Boost-Buck).

### 1-Hacheur élévateur (Boost) :

Un convertisseur Boost (ou Step-Up en anglais), ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

### 2-Hacheur abaisseur :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

Un convertisseur Buck bien conçu possède un fort rendement (jusqu'à 95 %) et offre la possibilité de réguler la tension de sortie.

### III.6.2. Redresseurs (AC/DC) :

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu ou pont de GRAETZ, est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension et un courant tous deux les plus continus possibles, à partir d'une source de tension alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension.

### III.6.3. Onduleur (DC/AC) :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternatif, alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir une tension et un courant alternatifs de valeur moyenne nulle. On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source :
  - ✓ Onduleurs de tension.
  - ✓ Onduleurs de courant.
- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc...).
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc...).

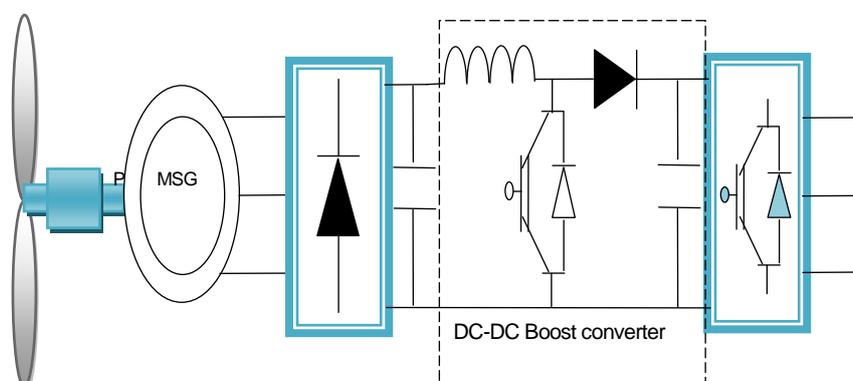


Figure III.8 : Description de l'éolienne

### **III.7 Conclusion :**

Ce chapitre, nous a permis d'étudier la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents à pôle lisse, en utilisant les hypothèses simplificatrices permettant d'avoir une description mathématique de différentes grandeurs de la machine dans un repère à deux axes (PARK).

En second lieu, nous avons montré la technique de commande maintenant le courant  $I_d$  grâce à un retour d'état découplant l'axe d de l'axe q. Ce découplage a pour effet de ramener la MSAP à un modèle linéaire équivalent à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

# Chapitre IV

## Simulation et résultats

### IV. Simulation et résultat

#### IV.1. Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous allons dans un premier temps l'architecture du système proposé avec les configurations possibles que nous pouvons en tirer, ensuite nous allons présenter les différentes simulations réalisées pour plusieurs scénarios possibles que nous avons choisies, aussi nous allons montrer les différents résultats des commandes que nous avons élaborées.

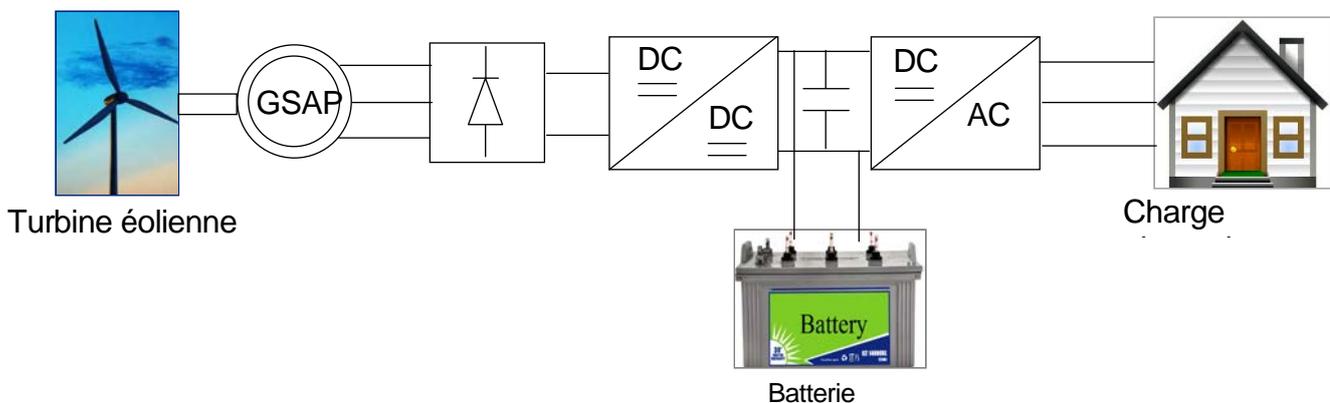
Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la simulation numérique du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink.

A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

#### IV.2. Architecture du système :

Différentes architectures peuvent être proposées pour l'utilisation de l'énergie éolienne pour la génération de l'électricité ; elles peuvent être hybride et intégrer d'autres sources d'énergie, ou des moyens de stockage électrochimique ou mécanique. Nous allons nous intéresser dans cette étude à une architecture très utilisée dans les moyennes et grande puissance, elle permet d'injecter l'énergie électrique produite directement dans le réseau électrique de distribution, à travers l'utilisation d'une machine électrique de type asynchrone à double alimentation.

Dans la figure ci-dessous nous pouvons voir les principaux éléments de l'architecture choisie.

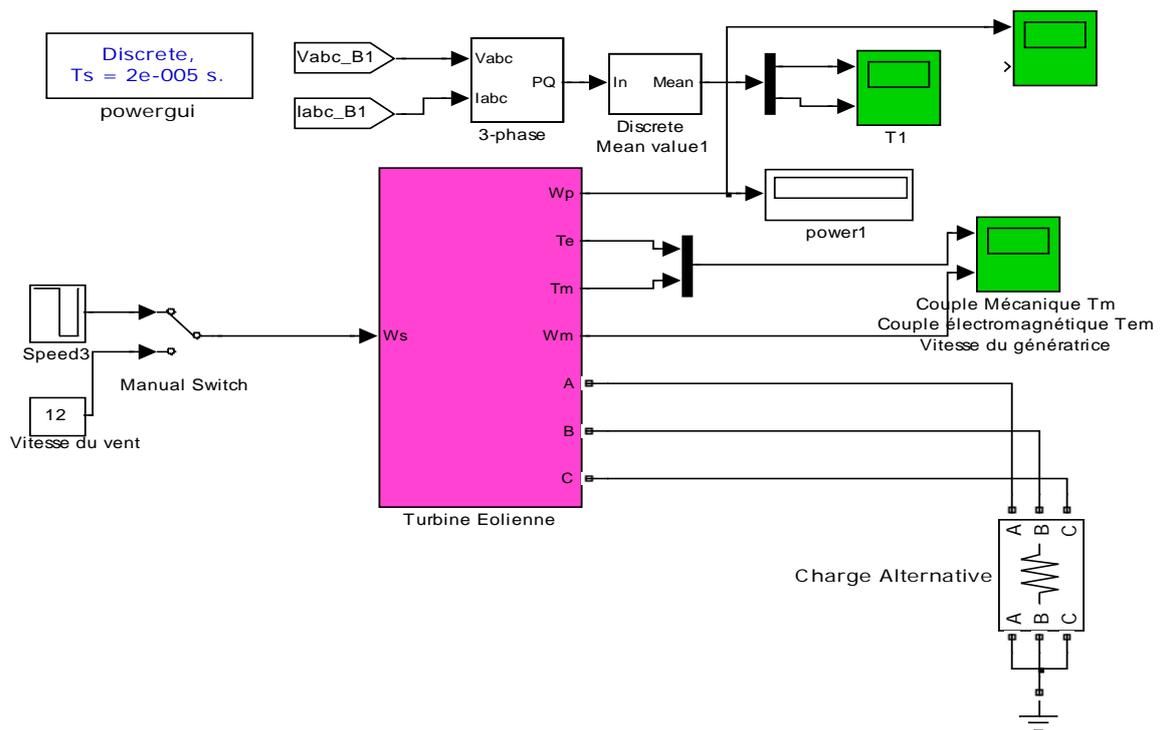


**Figure IV.1 :** architecture d'un système éolien isolé.

Cette architecture est basée sur l'utilisation de deux convertisseurs de puissance de type alternatif/continue. Le choix du fonctionnement de chaque convertisseur permet différentes configurations, où le flux de puissance traversant les différents composants du système permet un fonctionnement optimal et un rendement meilleur.

Les convertisseurs électroniques présentés précédemment ont besoin, pour fonctionner, de recevoir des ordres de commande.

**IV.3. Modèle du profil du vent sous Matab/Simulink :**



**Figure IV.2 : Schéma bloc de la turbine éolienne.**



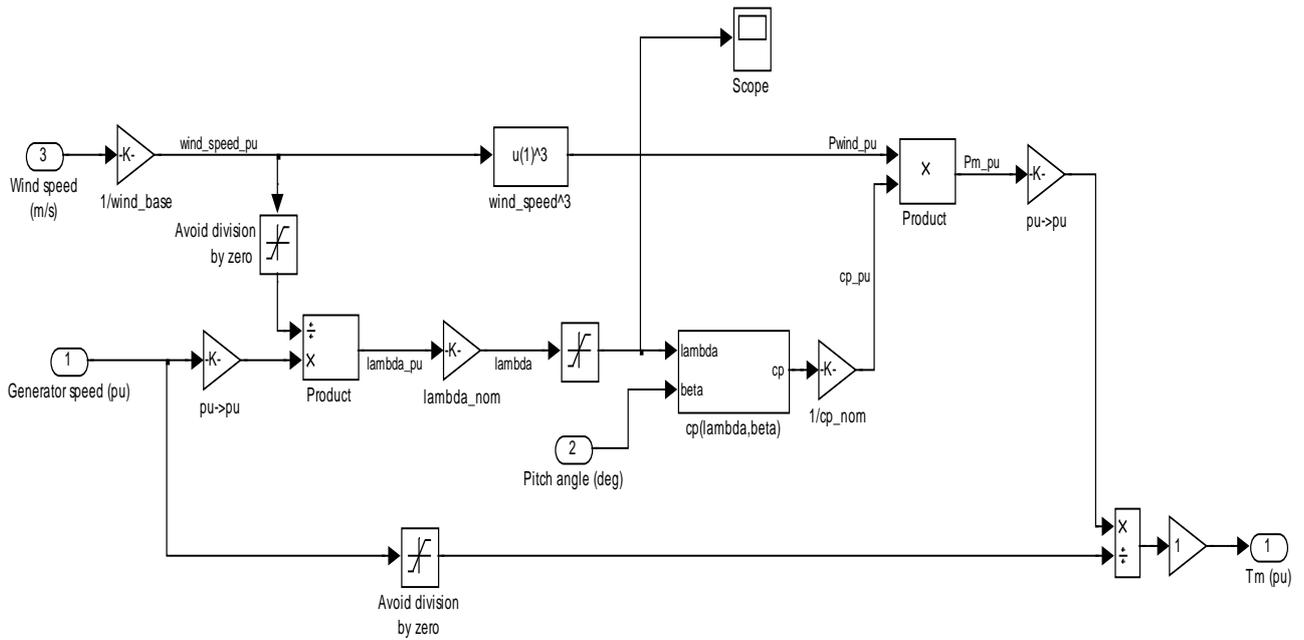


Figure IV.5 : Modèle de la turbine.

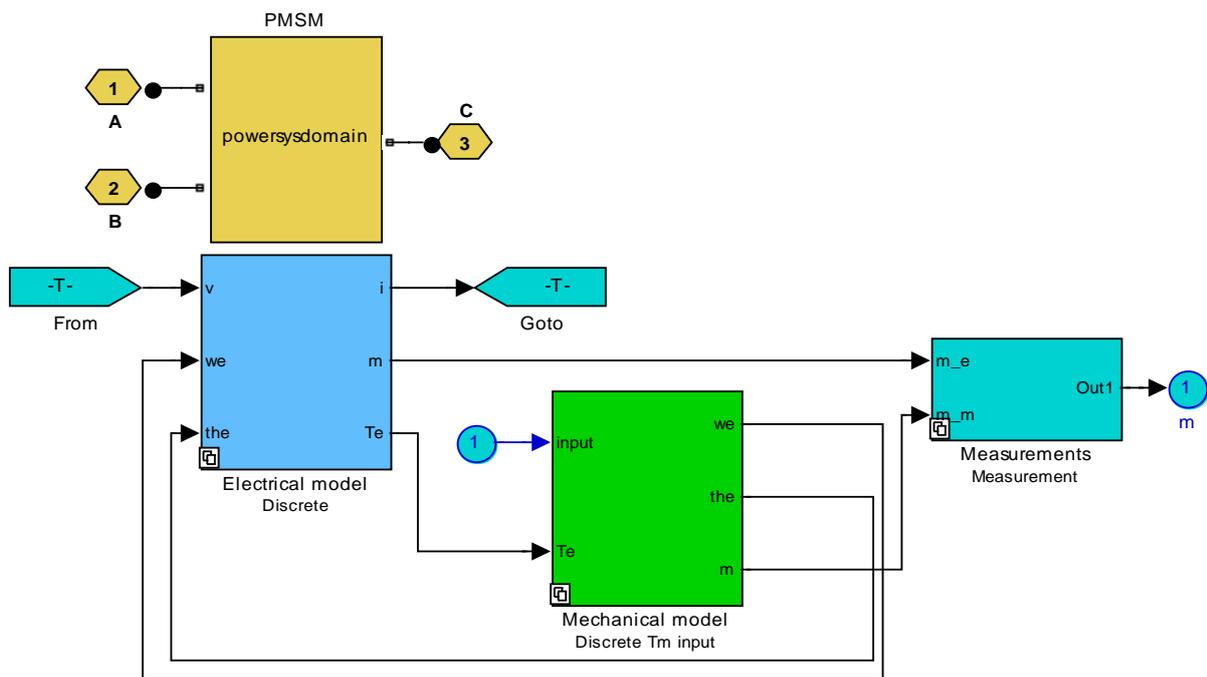
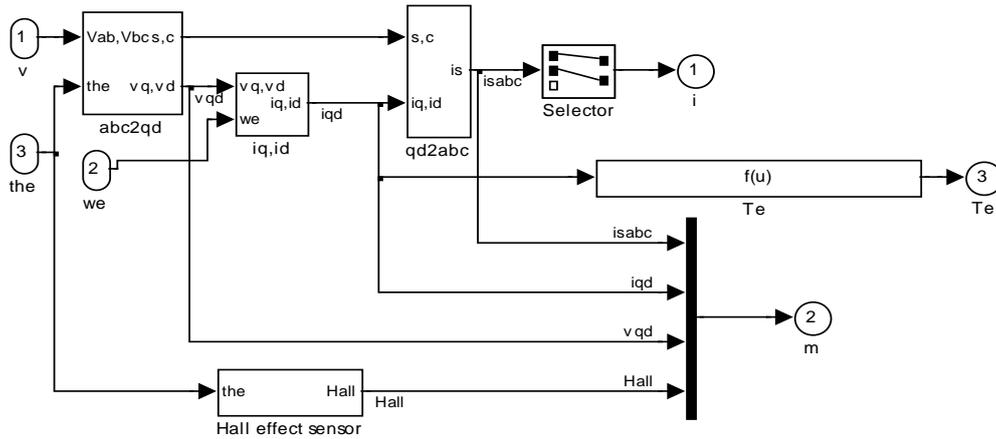
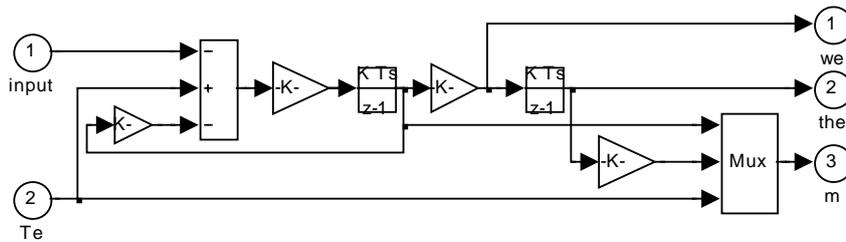


Figure IV.6 : Schéma bloc de la MSAP.

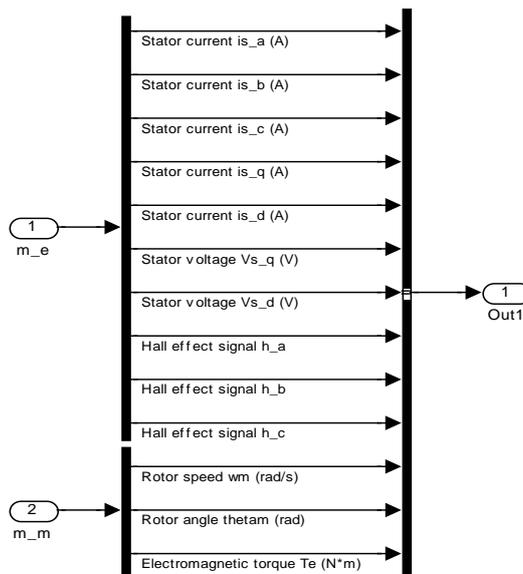
**IV.4. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents :**



**Figure IV.7 :** Model de la MSAP.



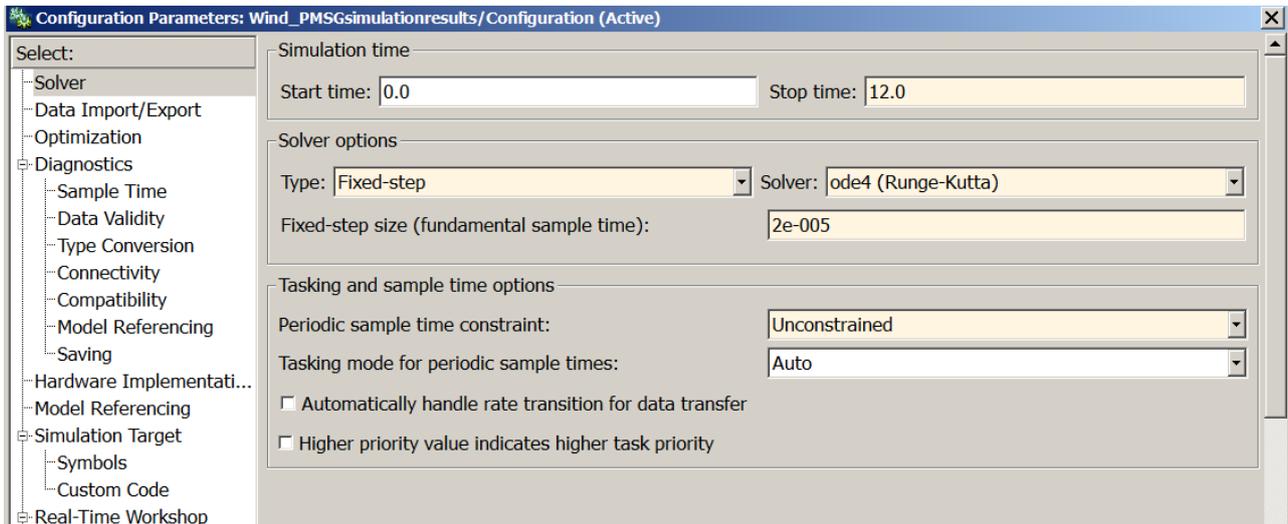
**Figure IV.8 :** Model de la MSAP.



**Figure IV.9 :** Model bloc de la MSAP.

## IV.5. Simulation du système avec turbine :

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulation du modèle de la machine synchrone à aimant permanent intégrée dans un système éolien. Nous avons choisi un profil du vent pour une période de 0 et 12 secondes, afin d'avoir une puissance active de référence, La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator. Les figures ci-dessous montrent les paramètres de la simulation.



**Figure V.10** : Paramètres de la simulation.

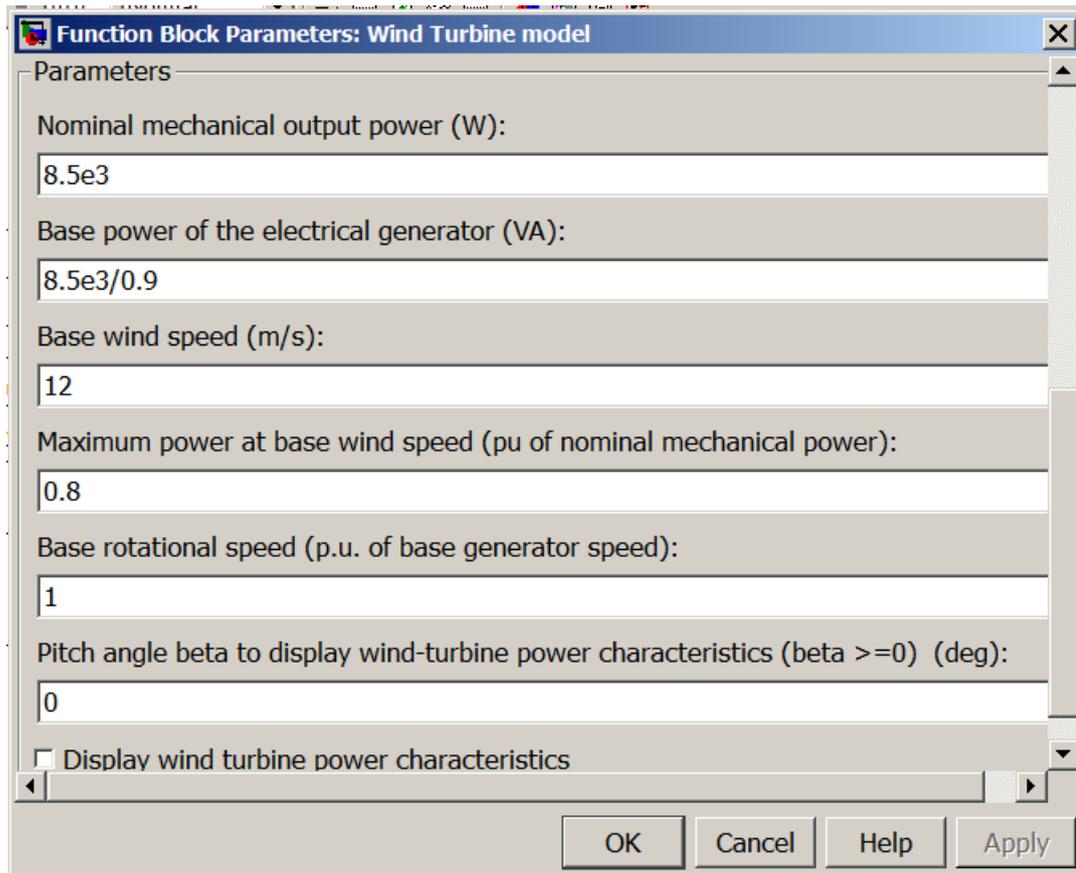
### IV.5.1. Vitesse du vent fixe :

Pour  $V=12\text{m/s}$ .

#### Constantes mécaniques :

Moment Inertie

Coefficient de frottement

**IV.5.1.1 Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :**

Function Block Parameters: Wind Turbine model

Parameters

Nominal mechanical output power (W):  
8.5e3

Base power of the electrical generator (VA):  
8.5e3/0.9

Base wind speed (m/s):  
12

Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):  
0.8

Base rotational speed (p.u. of base generator speed):  
1

Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg):  
0

Display wind turbine power characteristics

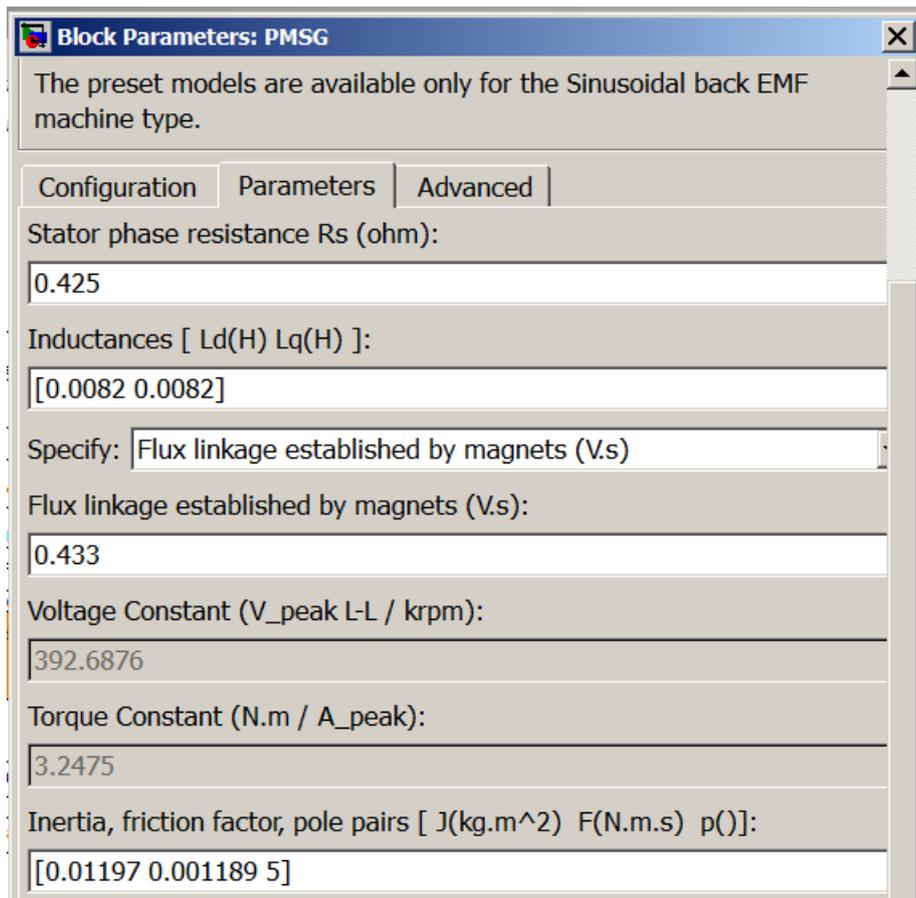
OK Cancel Help Apply

**Figure IV.11 :** Les paramètres de la turbine.

Puissance nominale (Nominal mechanical output power (W)): 8.5e3 Watts

Vitesse du vent (Base wind speed (m/s)): 12 m/s

**IV.5.1.2. Paramètres de la GSAP :**



**Figure IV.12 :** Les paramètres de la GSAP.

$V=392 \text{ V}$

$T=3.24 \text{ N.m}$

$J= 0.01197 \text{ J (kg.m}^2\text{)}$

$B= 0.001189 \text{ (N.m.s)}$

$P=5$

Flux  $f= 0.433 \text{ Wb}$

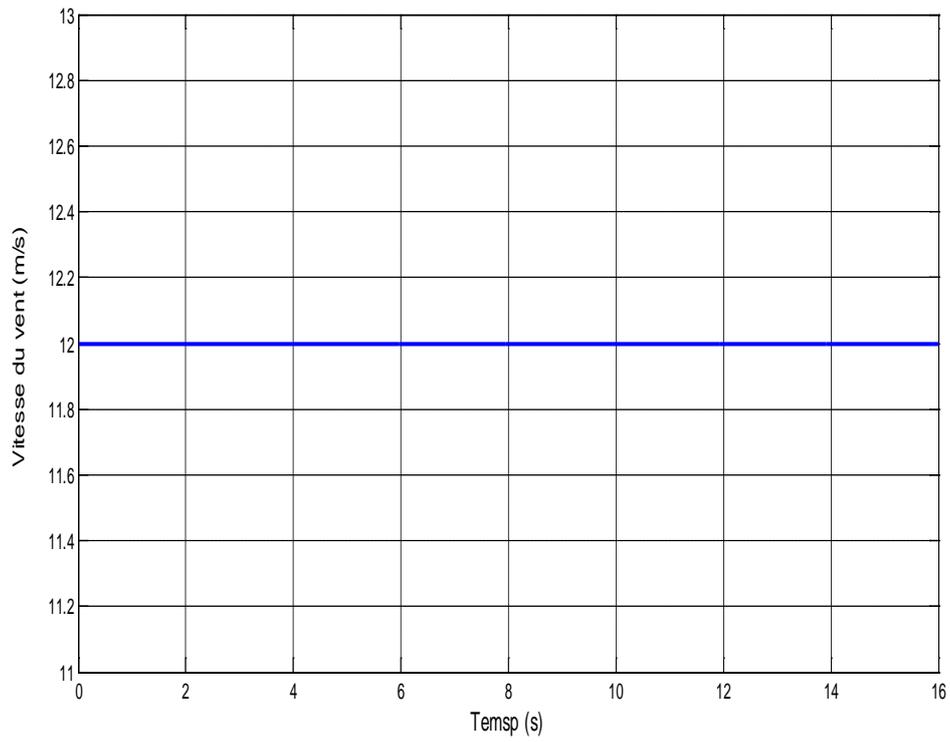
$R_s= 0.425 \text{ } \Omega$

$L_d= 0.0082 \text{ H}$

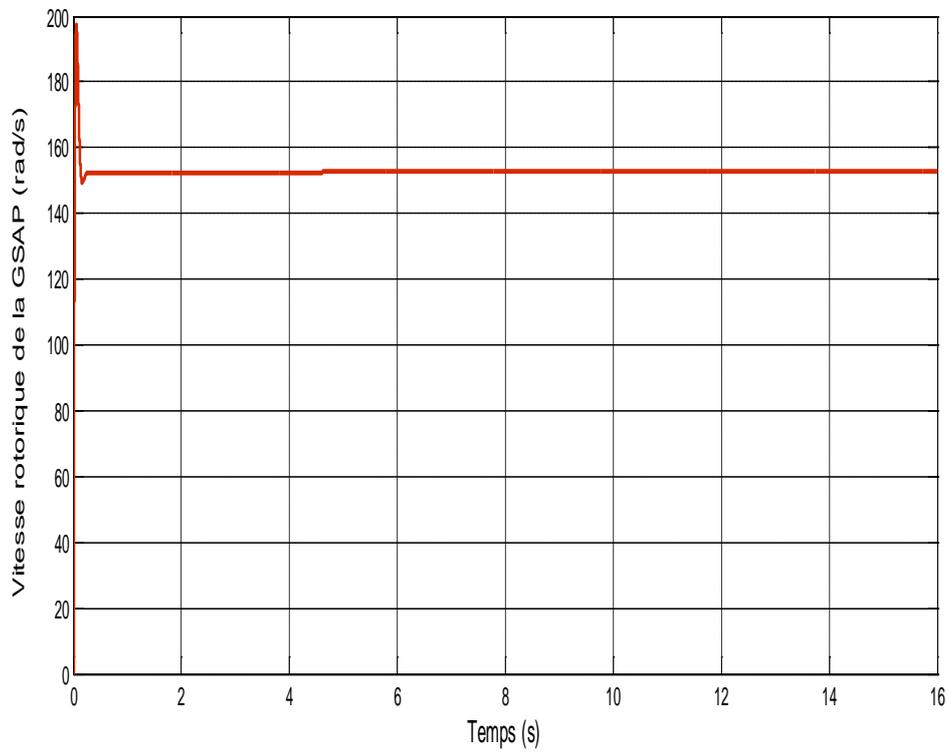
$L_q=0.0082 \text{ H}$

Pour  $v=12 \text{ m/s}$

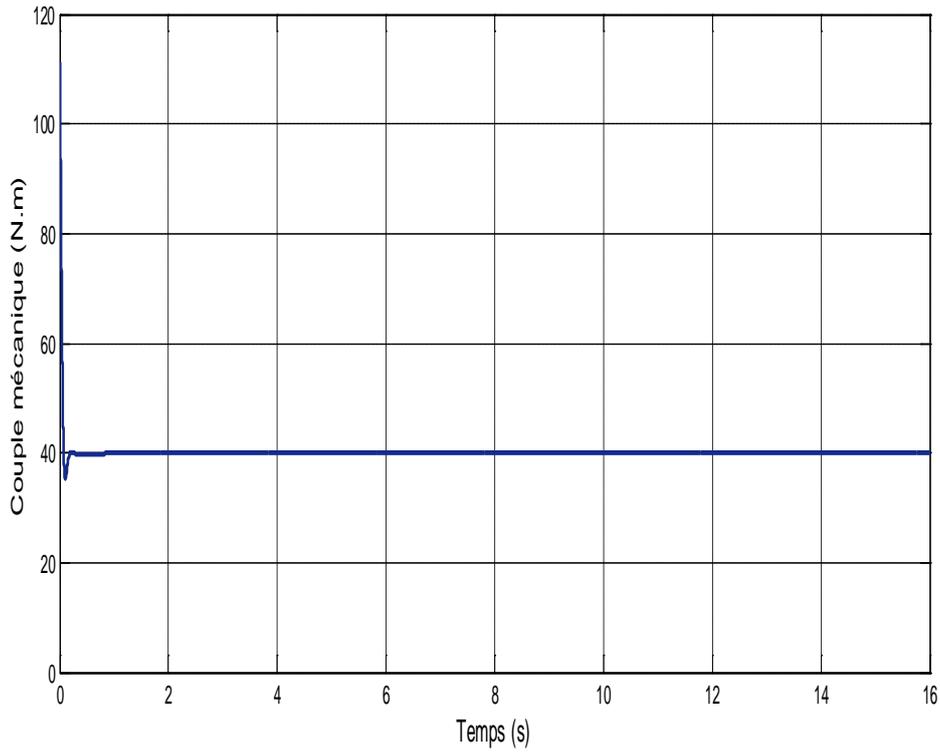
La charge  $R=25 \text{ } \Omega$



**Figure IV.13 :** Le profil de la vitesse du vent.

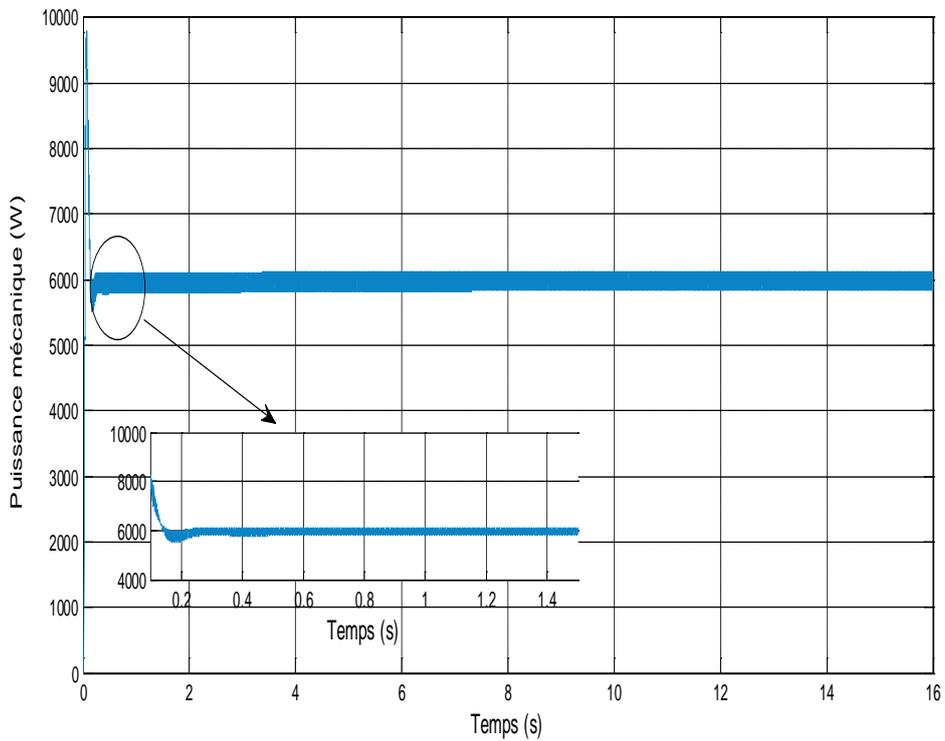


**Figure IV.14 :** Vitesse rotorique de la GSAP (rad/s).

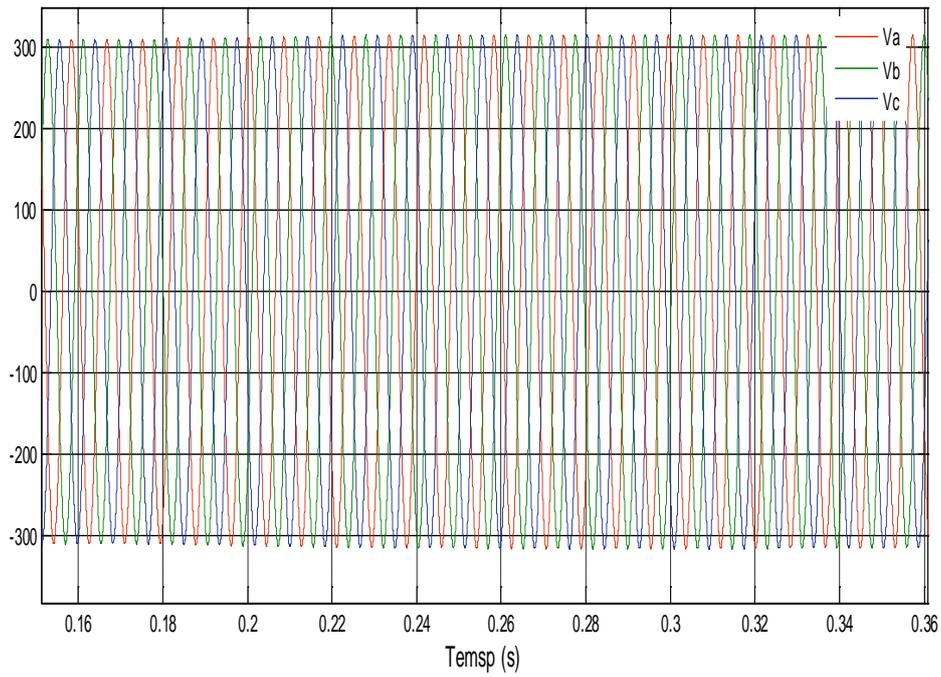
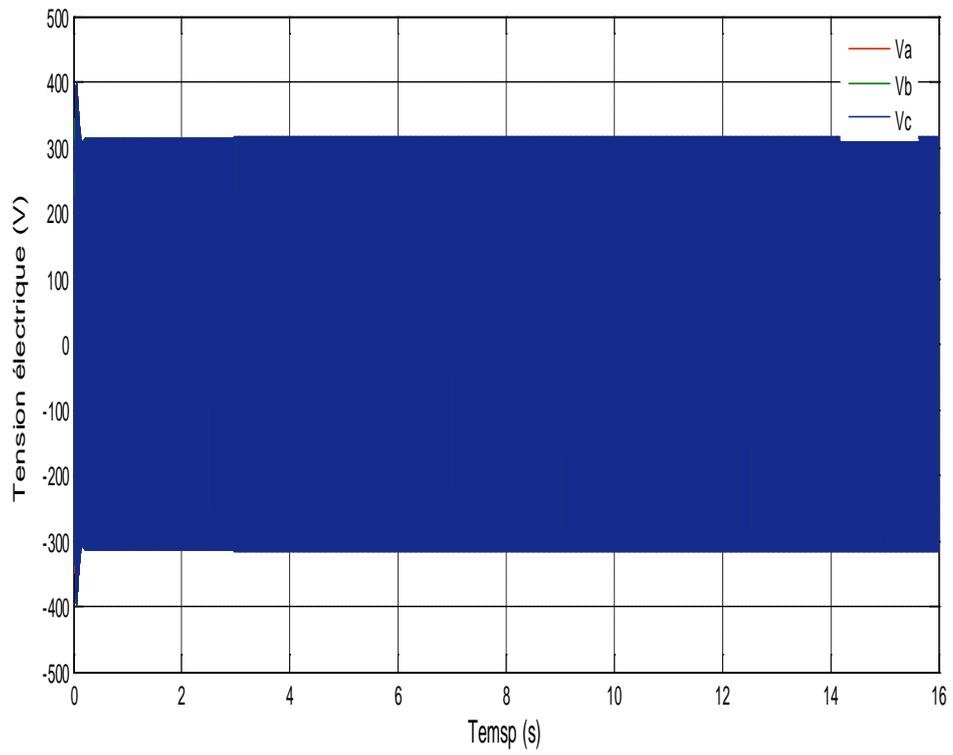


**Figure IV.15 :** Couple mécanique (N.m).

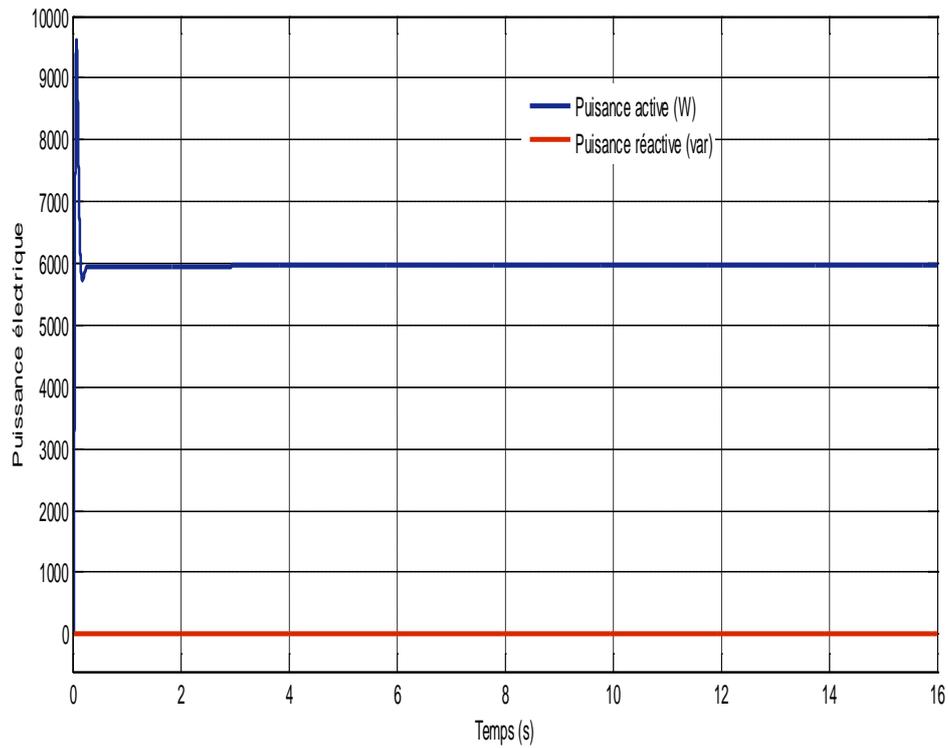
$T_m$



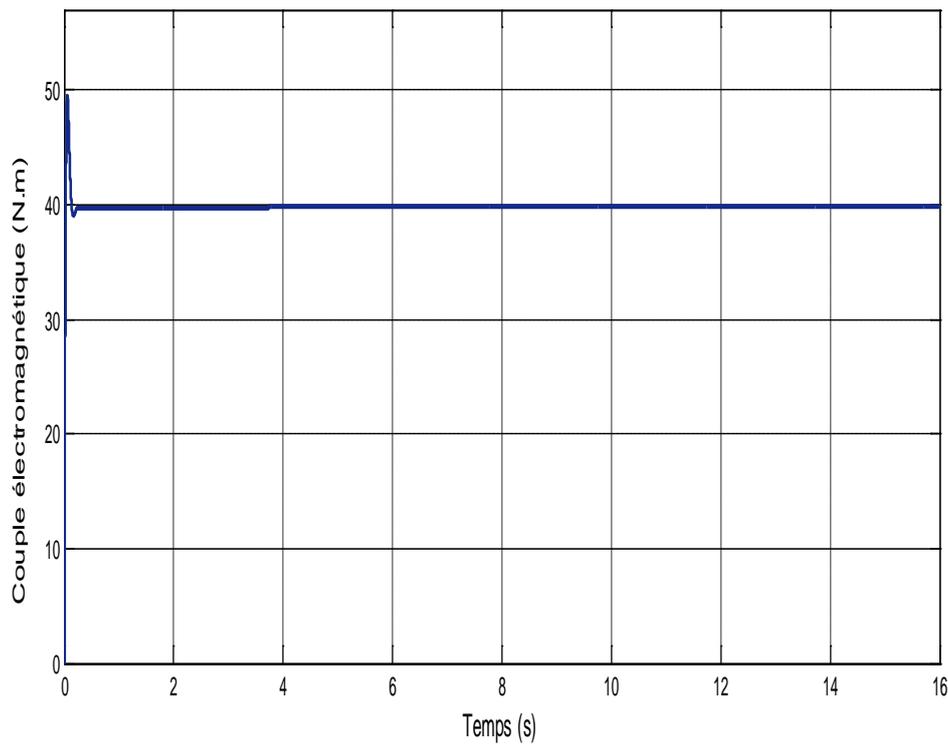
**Figure VI.16 :** La puissance mécanique (w)



**Figure IV.17:** La tension électrique (v).



**Figure IV.18 :** La puissance électrique active(W) et réactive(Var).

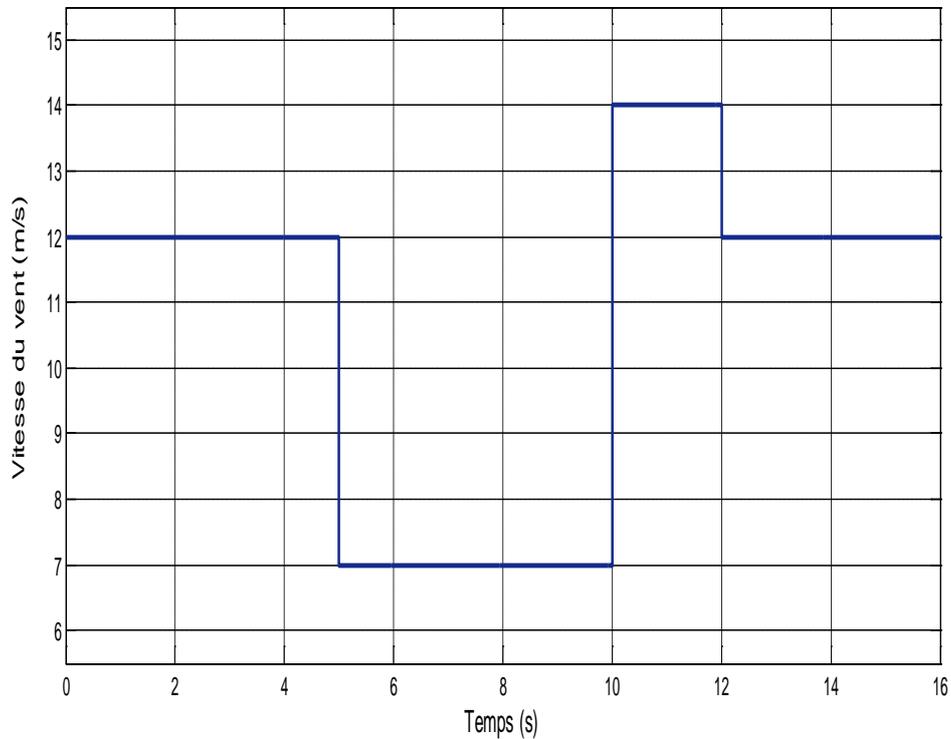


**Figure IV.19 :** Le Couple électromagnétique(N.m).

Pour une vitesse de vent fixe nous avons une meilleure poursuite de la puissance et une vitesse de rotorique plus stable. Voir la figure (IV.14) et figure (IV.16) et figure (IV.18).

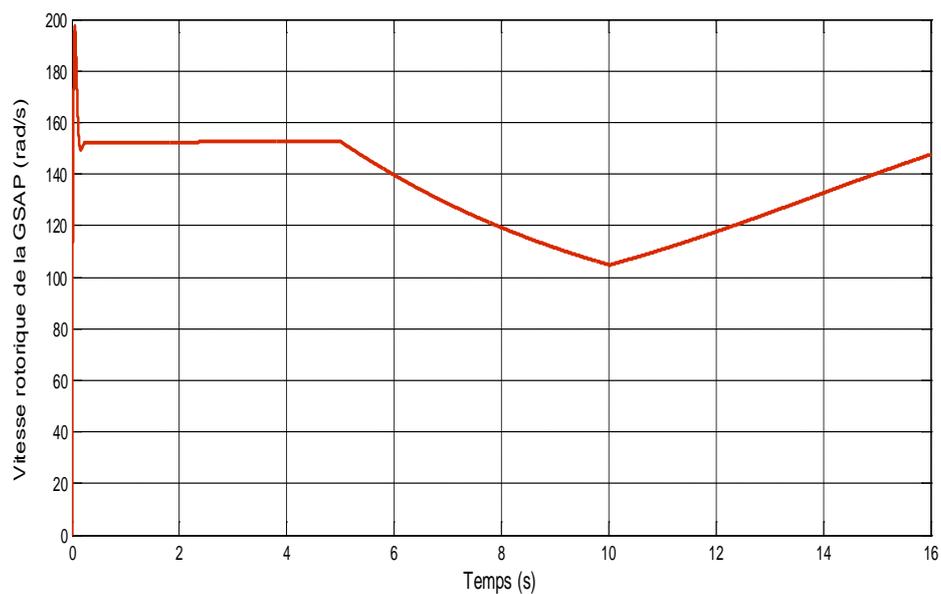
### IV.5.2. Vitesse du vent variable :

Par contre pour une vitesse de vent variable nous constatons que la vitesse de rotation est plus perturbée. Voir la figure (IV.20) et figure (IV.21).

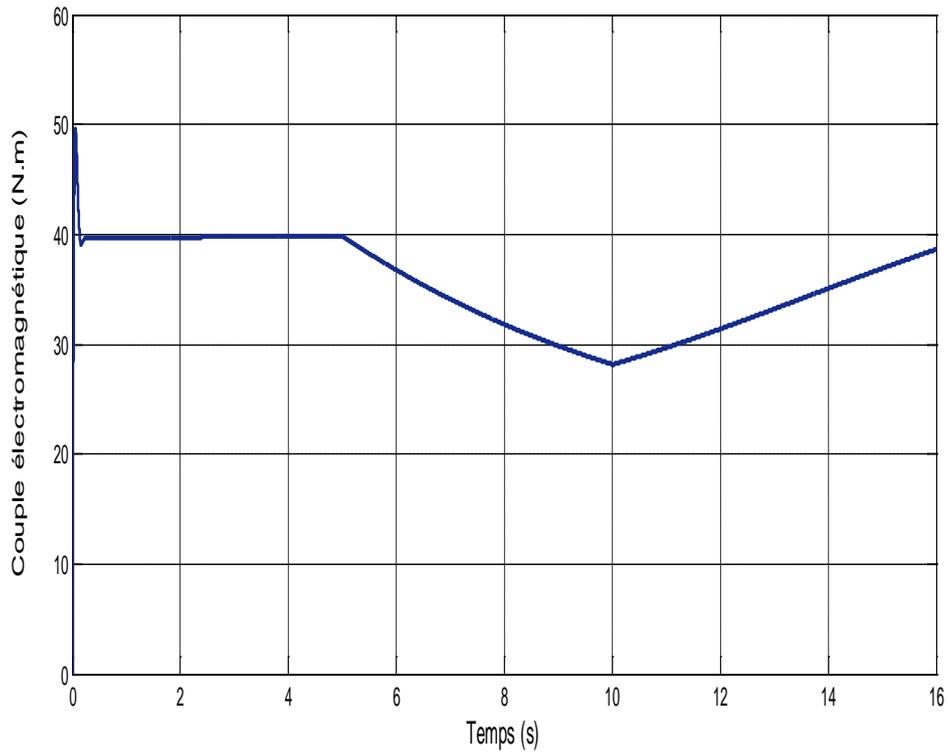


**Figure IV.20 :** Le profile de la vitesse du vent.

La figure (IV.20) montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (16s) entre deux valeurs ( $V=14\text{m/s}$ ) comme valeur maximale et ( $V=7\text{m/s}$ ) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

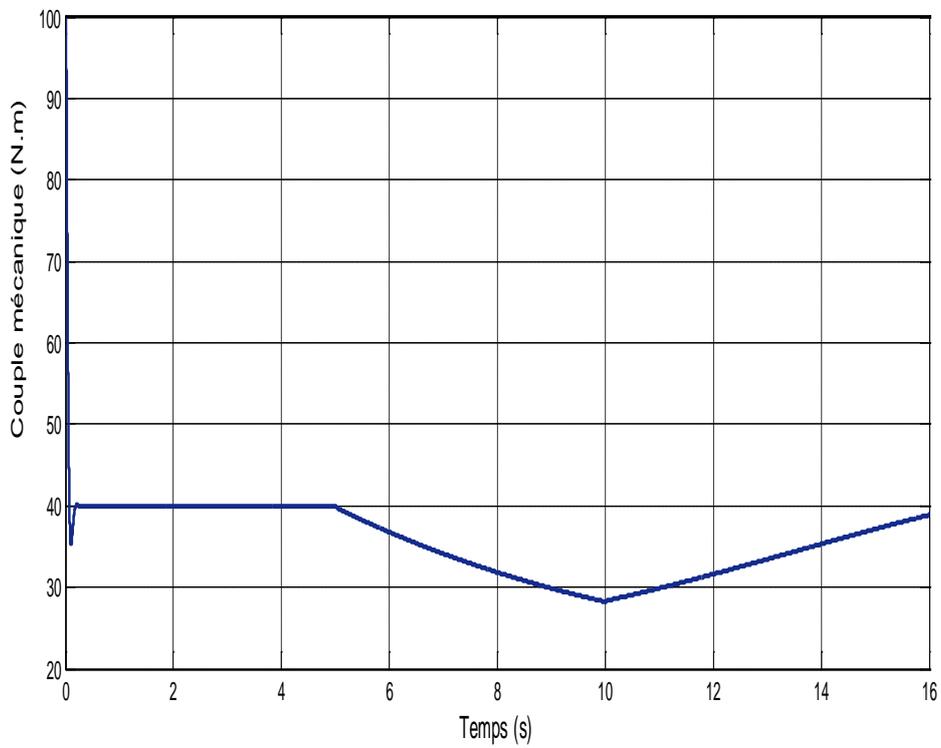


**Figure IV.21 :** Vitesse rotorique de GSAP (Rad/s).



**Figure IV.22 :** Le couple électromagnétique (N.m).

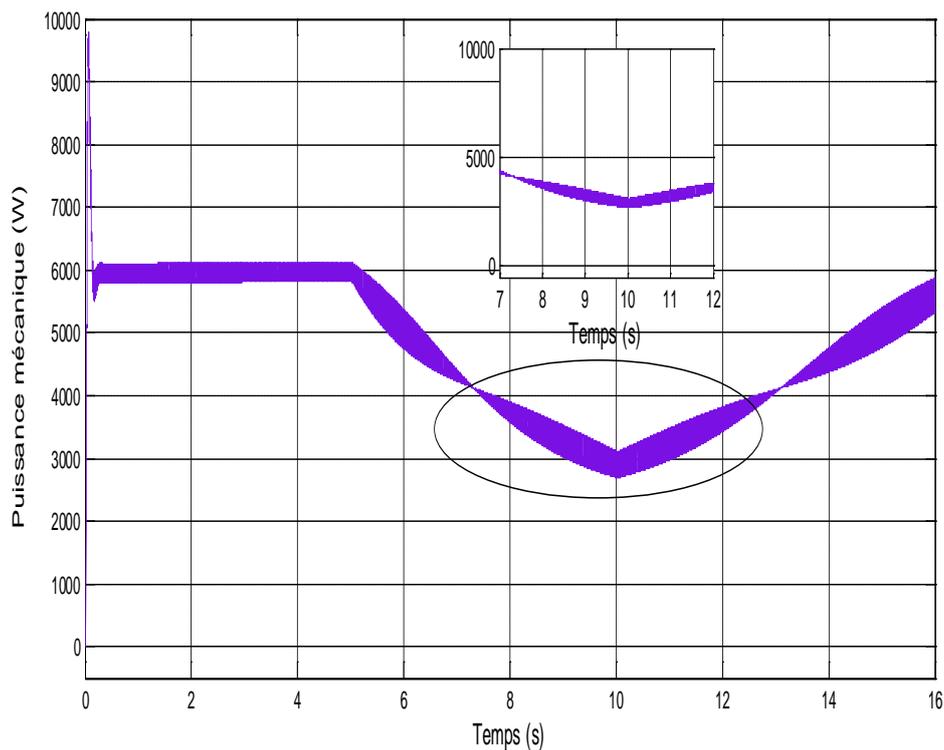
Tem



**Figure IV.23 :** Le couple mécanique (N.m).

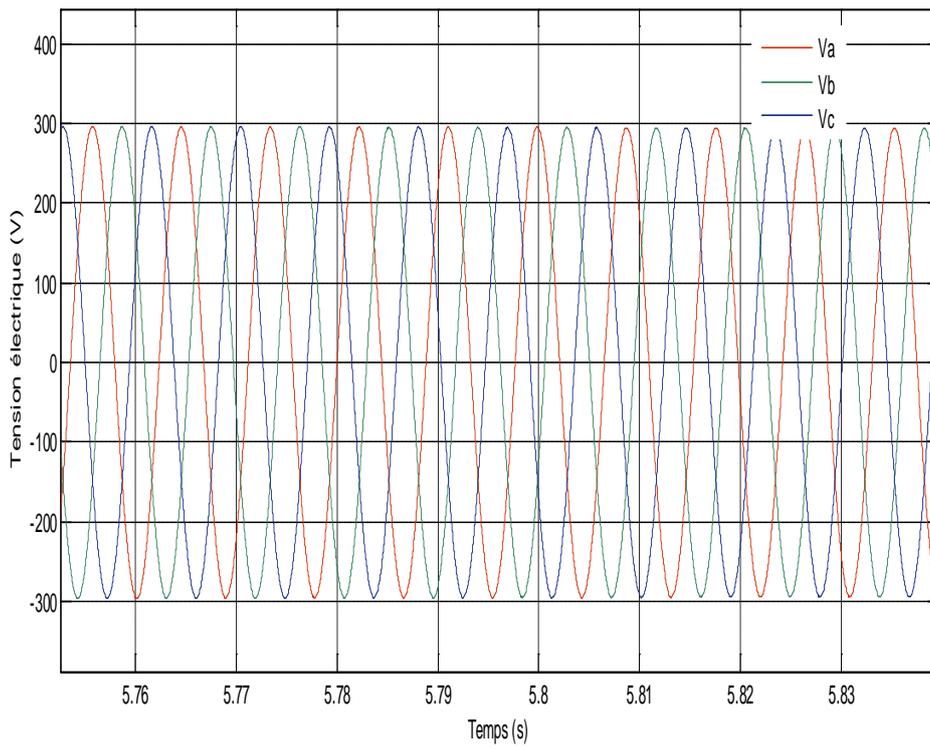
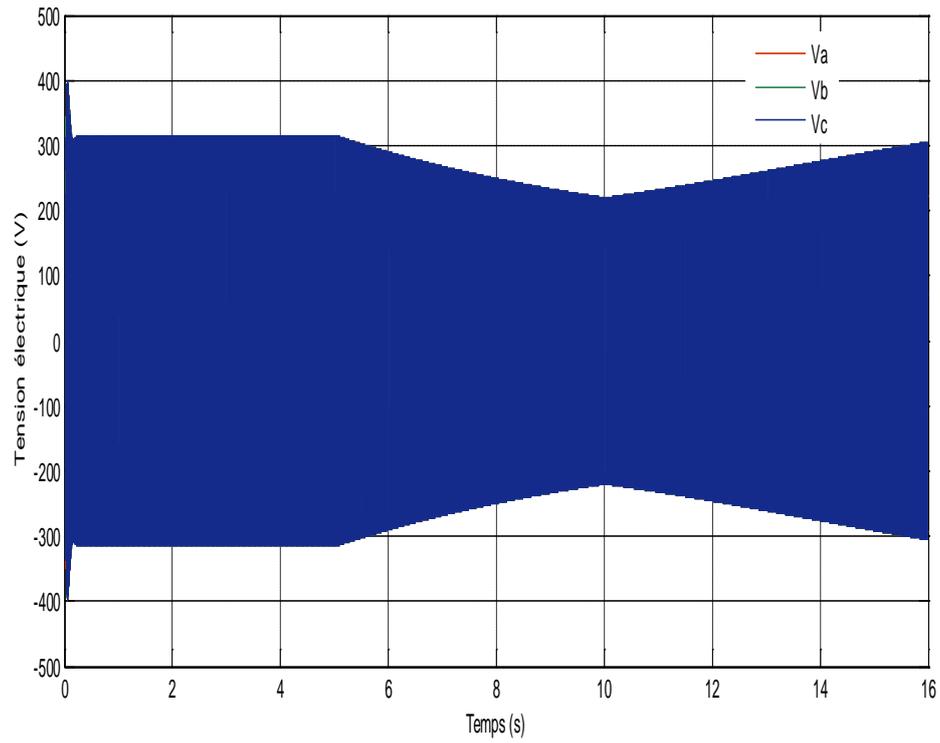
La figure (IV.23) montre l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme variable environ [29 40] ce qui montre clairement la perturbation que crée le MPPT sur le couple mécanique de la turbine ce qui altère la qualité de l'énergie électrique issue plus tard de la génératrice.

Dans ce deuxième test nous avons fait varier la vitesse de vent, et nous avons relevé que la vitesse rotationnelle du rotor reste toujours en hypo-synchronisme voire la figure (IV.20) et figure (IV.21).

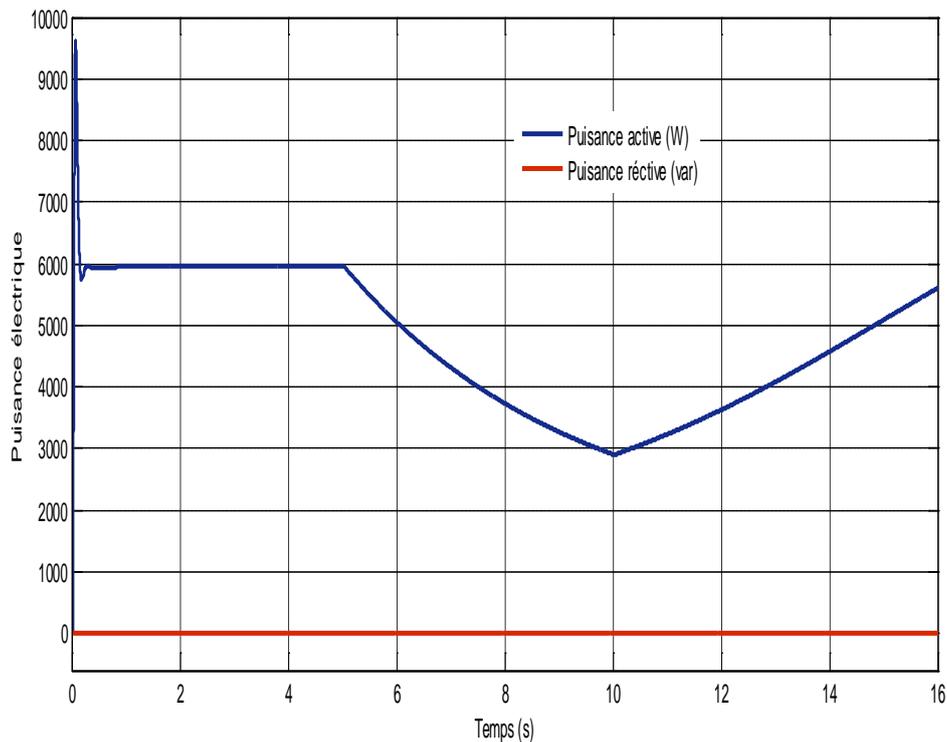


**Figure IV.24 :** Puissance mécanique (W).

La figure (III.24) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps pour un vent de vitesse variable, l'allure de la courbe est variable entre l'intervalle [2800 6000].



**Figure IV.25 :** La tension électrique (V).



**Figure IV.26 :** Allure de la puissance active et réactive.

On remarque que les puissances (active et réactive) sont adaptées à la variation de la vitesse du vent et on constate que la courbe de la puissance mécanique de la turbine est bien suivie par celle de la puissance électrique induite par la GSAP.

Nous remarquons sur ces courbes que la puissance électrique produite suit la forme de la puissance mécanique de référence, et la puissance réactive varie au tour de zéro. Voir la figure (IV.24) et le figure (IV.26).

#### IV.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation de différente architecture d'un système de conversion éolien connectée à une charge résistive alternative. Nous avons ainsi, présenté la simulation et l'influence des configurations choisies et des commandes implémentées sur les puissances injectées dans le réseau. Nous avons pu vérifier les performances de notre système en termes de puissance active et de puissance réactive tirées produites par la GSAP.

L'essentiel de notre contribution est abordé dans le présent chapitre, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne et décrit les différentes chaînes de conversion d'énergie

# Conclusion générale

## Conclusion générale :

Afin de protéger notre environnement et sauvegarder notre planète, la production des énergies propres et durables intéressent de plus en plus les pays.

L'Algérie comme tous les pays du monde s'intéressent à son tour à ces énergies dites propres et renouvelables en général, et à la filière éolienne en particulier. Le développement de ces énergies est en continuelle progression, grâce aux différentes recherches et études effectuées de par le monde.

Dans ce contexte nous nous sommes intéressés à la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la machine éolienne, en donnant les généralités sur son évolution, son utilisation, les différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal en rendant compte de l'état actuel de l'exploitation dans le monde et en Algérie de ce créneau énergétique. Puis nous avons parlé Nous avons également traité les avantages et les inconvénients des éoliennes. Les différents composants d'une éolienne à axe horizontale et ses domaines d'applications.

Dans le chapitre deux, nous avons modélisé le vent qui est la source principale d'énergie. Nous avons ensuite modélisé la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Une commande de la turbine, de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent, a été effectuée grâce à une vitesse du vent fixe puis une vitesse du vent variable, quelques résultats de simulation ont été ensuite donnés. Afin de comparer les performances de chacun des deux.

Le chapitre trois a été consacré à la génératrice synchrone à aimant permanents nous avons modélisé la MSAP, ensuite, on a utilisé l'outil MATLAB/Simulink pour faire des simulations permettant de visualiser l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques. Cette modélisation est basée essentiellement sur la transformation de *Park*. Les machines synchrones utilisées en vitesse variable doivent être autopilotées, à travers l'utilisation d'un onduleur.

Enfin, le dernier chapitre a été réservé au résultat de la simulation du système éolien.

Nous avons donc abordé un sujet qui est en plein développement. Cette thématique est nouvelle et nous sommes heureux d'avoir pu aboutir au terme d'une année de recherche à des résultats de simulation effectué sur Matlab/Simulink en direct avec des résultats concluons pouvant être utilisés pour poursuivre les essais et envisage d'autres fonctionnements.

# Bibliographie

- [1] R. MAMMAD « Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique » thèse de master, université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen .
- [2]<https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-en-europe-et-dans-le-monde-en-2017-180214>
- [3] [www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-l-algerie-ina...](http://www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-l-algerie-ina...)  
« L'Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10 ».
- [4] D. ROYE.S. BACHAABD R. BELHOMME, « Technologie des systèmes éoliennes intégration dans les réseaux électriques », la Revue3EI, no.39, 2004
- [5] M. SI-BRAHIMI » étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne a base de la machine asynchrone » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015
- [6] Adema, agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, produire de l'électricité avec le vent, novembre 2012.
- [7] R. BAÏLE « Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent application à la prévision de la ressource éolienne », université de Corse le 18 Octobre 2010.
- [08] H. CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [9] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [10] A. ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [11] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [12] A. ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [13] L. MOURAD « Synthèse de lois de commande non-linéaire pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, université Aboubakar Belkaid-Tlemcen, 2016.
- [14] M. LISERRE, R. CÁRDENAS, M. MOLINAS, J. RODRÍGUEZ, "Overview of Multi- MW Wind Turbines and Wind Parks," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol.

58, no. 4, pp. 1081–1095, April 2011

[15] J. Deferne, « Presque tout sur les éoliennes et un petit peu sur les panneaux photovoltaïques »  
5 janvier 2018.

[16] M. SATHYAJITH « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006

[17] RAZ ENERGIE 4– Implantations d'éoliennes à Montjardin (11) – *Etude d'impact* - Cabinet  
ECTARE – Réf. 93124 – Mai 2013

[18]<https://www.connaissancedesenergies.org/pourquoi-la-plupart-des-eoliennes-ont-elles-trois-pales-140919>

[19] Frédéric POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.

[20] BOUHEDDA Ali ; « contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne » ;  
Mémoire de magistère en électrotechnique ; univ Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou ; 2011.

[21] A. DAVIGNY « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant  
du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des  
Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007

[22] H. CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération  
d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure  
d'arts et métiers, 2003.

[23] E. MULJADI, K. PIERCE et P. MIGLIORE – « Control strategy for variable speed,  
stall-regulated wind turbines », American Controls Conference, Philadelphia, PA, Juin  
24-26, 1998.

[24] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie  
éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au  
réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.

[25] M. MALKI et S. ALI BELARBI « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau  
(Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret », Thèse de Master, université Aboubakar  
Belkaid, Tlemcen, 2014.

[26] Panos M. Pardalos, Steffen Rebennack Mario V. F. Pereira et Niko A. Iliadis Vijay Pappu  
Editors « Handbook of Wind Power Systems » Springer.

[27] E. Muljadi, K. Pierce et P. Migliore, « Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind  
turbines », American Controls Conference, Philadelphia, PA , Juin 24-26, 1998.

[28] A. Diop « Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateurs  
Simulation et commande en temps réel d'une turbine de puissance moyenne à angle de calage  
variable », Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, 1999.

- [29] N. Laverdure « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » ; thèse doctorat de l'INPG ; Spécialisé : Génie électrique ; 09 décembre 2005.
- [30] F. Kendouli & K. Nabti, & K. Abed et H. Benalla « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14 N°1, pp.109 – 120, 2011.
- [31] Lamri LOUZE, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée ». », Thèse de doctorat D'université mentouri - Constantine. 08/07/2010
- [32] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [33] K. IDJDARENE « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eolien autonomes » Thèse de Doctorat Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, Université Lille 1, 2010
- [34] M. LOPEZ « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de doctorat Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes », Université parissud 11, 2008
- [35] A. ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [36] D. REKIOUA, K. IDJDARENE, T. REKIOUA ET A. TOUNZI « Vector controlled strategy of an autonomous induction generator: modeling and simulation », International Conference on Modeling and Simulation (ICMS'05), Marrakech, Maroc, 22-24 November 2005, pp. 1-5.
- [37] A. DAVIGNY « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007
- [38] [https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/c=system\\_640x/i4wyMQ/uu35qYKFiPRAIvqlcE3m6Q/Valhalla\\_1.jpg?fv=11e2](https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/c=system_640x/i4wyMQ/uu35qYKFiPRAIvqlcE3m6Q/Valhalla_1.jpg?fv=11e2)
- [39] <http://tpe2lcl.e-monsite.com/medias/images/2-29.png>

## Résumé :

Ce travail, porte sur la modélisation et le contrôle d'une turbine éolienne à vitesse Fixe et variable, cette dernière est basée sur une génératrice synchrone à aimant permanent de moyenne puissance. L'énergie récoltée est injecté dans le une charge alternative à travers un convertisseur de puissance, pour une meilleure intégration et une qualité de courant optimale.

Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) est de plus en plus utilisé dans le domaine industriel grâce à ses performances supérieures aux autres types de moteurs.

Enfin, ce travail a été conclu par des simulations est des résultats qui nous ont permis de valider les modèles développés.

## Mots clés:

Turbine Eolienne, MSAP, vitesse variable

## ملخص :

يتعلق هذا العمل بالتمذجة والتحكم في توربينات الرياح الثابتة والمتغيرة السرعة ، والتي تقوم على مولد متزامن مع مغناطيس دائم للقدرة المتوسطة. يتم حقن الطاقة التي تم حصادها في حمل متناوب من خلال ملء الطاقة، لتحقيق تكامل أفضل وجودة تيار مثالية

يستخدم محرك المغناطيس الدائم المتزامن بشكل متزايد في المجال الصناعي بسبب أدائه المتفوق لأنواع أخرى من المحركات

أخيراً، تم الانتهاء من هذا العمل من خلال المحاكاة والنتائج التي سمحت لنا بالتحقق من صحة النماذج التي تم تطويرها

## كلمات مفتاحية:

متغيرة السرعة، MSAP ، توربينات الرياح.

## Abstract :

This work concerns the modeling and control of a fixed and variable speed wind turbine, which is based on a synchronous generator with permanent magnet of medium power? The harvested energy is injected into an alternating load through a power converter, for better integration and optimum current quality.

The Permanent Magnet Synchronous Motor (MSAP) is increasingly used in the industrial field because of its superior performance over other types of motors.

Finally, this work was concluded by simulations and results that allowed us to validate the models developed.

## Keywords:

Wind Turbine, MSAP, variable speed