

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

**UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR**  
**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DES SCIENCES TECHNOLOGIES**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET ENERGIE RENOUEVABLE**

## **Thème**

**Modélisation Energétique et Prévisions de La Vitesse du Vent  
Menant à l'estimation de la Production d'énergie Eolienne**

**Soutenu le :**

**Présenté par :**

AKABLI Yamina

**Encadré par :** Dr. HARROUZ Abdelkader

**Président :** Mr. BAKOU YUCEF

**Examineurs :** Mr. YAICHI Ibrahim

**2016 - 2017**

# Remerciements

*En premier lieu, je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a guidé tout au long de ce travail et rendu possible la réalisation de mon Projet de Fin d'Etudes.*

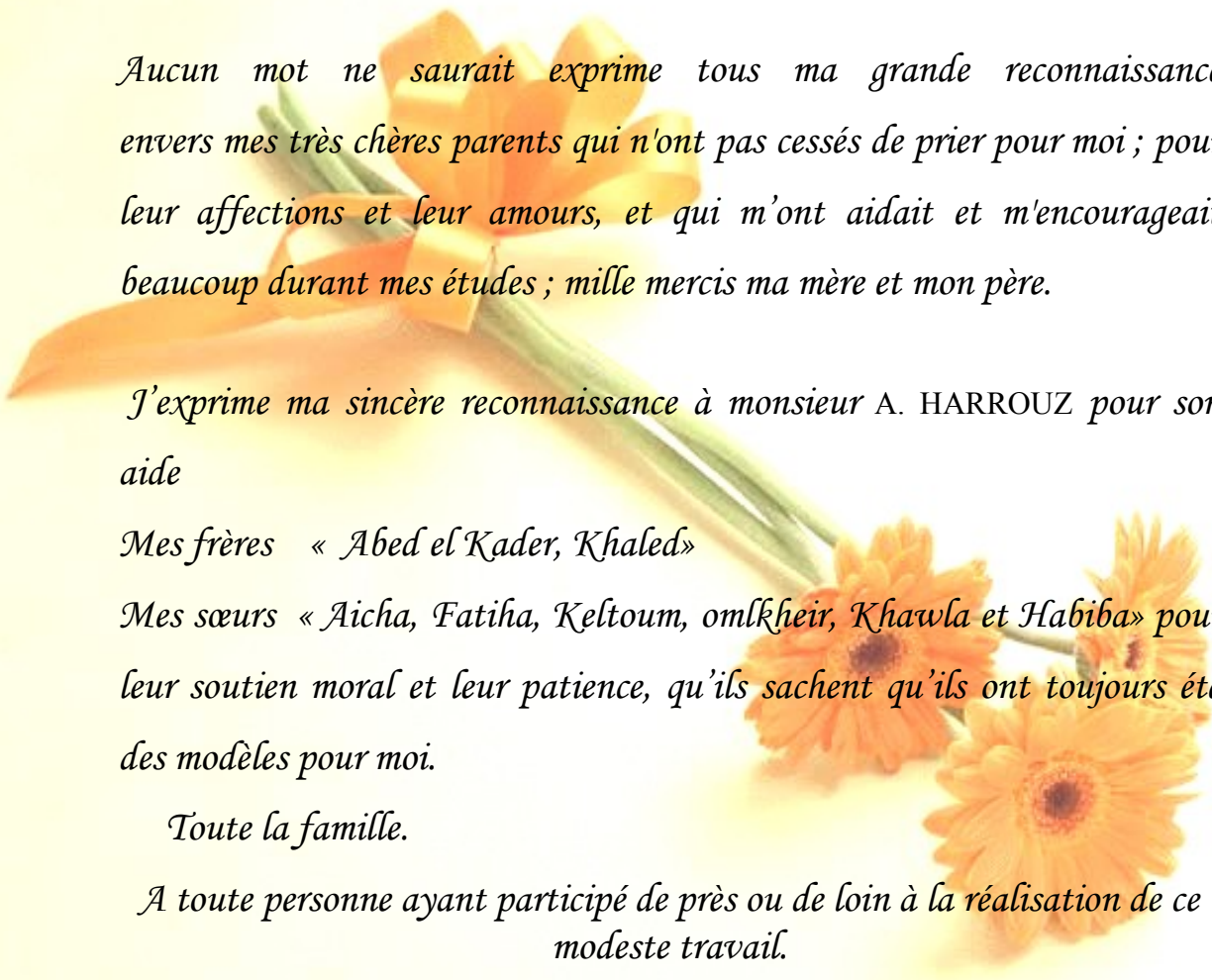
*Je remercie mon promoteur A. HARROUZ, à qui je tiens à exprimer, ma profonde gratitude de m'avoir prodigué ses précieux conseils, ses aides permanentes, ses idées originales, sa compétence, ses critiques constructive et sa patience, et qu'il trouve ici mon estime pour sa grande personne ainsi que mon profond respect. Merci pour ses encouragements dans les périodes de doute et un peu difficiles.*

*Mes vifs remerciements vont en suite au membre du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.*

*Je remercie également tous les amis de ma promotion qui m'ont aidée directement ou indirectement à la réalisation de ce travail*

*... Merci à Tous et pour Tout.*

# Dédicaces



*Aucun mot ne saurait exprime tous ma grande reconnaissance envers mes très chères parents qui n'ont pas cessés de prier pour moi ; pour leur affections et leur amours, et qui m'ont aidait et m'encourageait beaucoup durant mes études ; mille mercis ma mère et mon père.*

*J'exprime ma sincère reconnaissance à monsieur A. HARROUZ pour son aide*

*Mes frères « Abed el Kader, Khaled »*

*Mes sœurs « Aicha, Fatiha, Keltoum, omkheir, Khawla et Habiba » pour leur soutien moral et leur patience, qu'ils sachent qu'ils ont toujours été des modèles pour moi.*

*Toute la famille.*

*A toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

*Ce travail est dédié également à la promotion de physique énergétique 2017.*

**YAMINA**

## Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Résumé	
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Etat de l'art du système éolien</b>	
I.1	Introduction ..... 4
I.2	Génération d'énergie renouvelable.... 4
I.2.1	Génération de la chaleur..... 4
I.2.2	Génération d'électricité..... 7
I.3	Production éolienne..... 8
I.4	Définition de l'énergie éolienne..... 9
I.5	Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne..... 10
I.6	L'énergie éolienne en quelques chiffres..... 10
I.6.1	Données Chiffrées sur l'éolien..... 10
I.6.2	L'éolienne en Algérie : ..... 11
I.6.3	Projet à faire en l'Algérie..... 13
I.7	Constitution d'une éolienne..... 14
I.7.1	Principe de fonctionnement ..... 14
I.7.2	Constitution..... 15
I.8	Les différents types des turbines éoliennes.... 16
I.8.1	Les éoliennes à axe vertical..... 16
I.8.2	Les éoliennes à axe horizontal..... 17
I.9	Types des machines électriques dans les systèmes éoliennes ..... 19
I.9.1	Générateur synchrone..... 19
I.9.2	Générateur Asynchrone..... 21
I.10	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.... 22
I.10.1	Avantages..... 22
I.10.2	Inconvénients..... 23
I.11	Conclusion..... 23
<b>Chapitre : Modélisation du vent et le système éolienne</b>	
II.1	Introduction ..... 25
II.2	Distribution et caractéristique de vent : ..... 25

II.2.1	Variations temporelles du vent : l'aléa éolien .....	25
II.2.2	Les caractéristiques du vent : .....	26
II.2.3	Analyse des données de la vitesse moyenne du vent .....	27
II.2.4	Distribution statistique : .....	28
II.2.5	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne .....	29
II.2.6	La caractéristique CP ( $\lambda$ ) : .....	30
II.3	Les modèles de vitesse du vent proposées .....	31
II.3.1	La première modèle .....	31
II.3.2	La deuxième modèle .....	32
II.3.3	La troisième modèle.....	32
II.4	Modèle de la machine synchrone : .....	36
II.4.1	Equations de MSAP dans le plan de Park: .....	37
II.4.2	Calcul de puissance .....	38
II.4.3	Expression du couple électromagnétique [12] .....	38
II.5	Modélisation de la turbine éolienne .....	38
II.6	Modélisation du couplage turbine – génératrice .....	41
II.7	Modélisation de l'association MSAP – Redresseur à diode : .....	42
II.8	Modélisation du dispositif de stockage .....	43
II.9	Conclusion .....	46

### ChapitrIII : simulation le système globale

III.1	Introduction .....	48
III.2	Simulation de système éolienne .....	48
III.2.1	Simulation des trois modèles du vent.....	49
III.2.1.1	La 1 <sup>ère</sup> modèle du vent : .....	49
III.2.1.2	La 2 <sup>ème</sup> modèle : .....	49
III.2.1.3	La 3 <sup>ème</sup> modèle : .....	50
	La 3eme modèle ce que nous avons, leur résultat de simulation est donné par la figure qui suit : .....	50
III.2.2	Simulation de la turbine : .....	50
III.2.3	Simulation de la génératrice : .....	52
III.2.3.1	Fonctionnement à vide.....	53
III.2.3.1.1	Interprétation des résultats.....	54
III.2.3.2	Fonctionnement en charge (Rch, Lch) .....	54
III.2.3.2.1	Interprétation des résultats.....	58
III.3	Simulation de génératrice GSAP avec les trois modèles de vitesse de vent .....	58
III.3.1	1 <sup>ère</sup> Modèle .....	58
III.3.1.1	Interprétation .....	60

III.3.2	2 <sup>eme</sup> Modèle .....	60
III.3.2.1	Interprétation .....	62
III.3.3	3 <sup>eme</sup> Modèle .....	62
III.3.3.1	Interprétation des résultats.....	63
III.4	Conclusion .....	64
	Conclusion générale.....	66
	Bibliographie	
	Annexes	

## Liste des tableaux

### Chapitre I

Tableau (I-1) : classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.....	21
---	----

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1: centralesolaires thermique .....	5
Figure I.2 : Le principe d'énergie géothermique .....	6
Figure I.3 : La production d'énergie par la biomasse.....	6
Figure I.4 : Centrale hydraulique .....	7
Figure I.5 : La production d'énergie par des cellules photovoltaïques .....	8
Figure I.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	8
Figure I.7 : puissance éolienne installée annuelle dans le monde depuis 2001 (en MW)....	11
Figure I.8 : Répartition mondiale du marché (à gauche) et la puissance (à droite) éolienne en 2016.....	11
Figure I.9 : présente la carte des vents en Algérie.....	13
Figure I.10 : la ferme éolienne à Adrar .....	13
Figure I.11 : Principe de la conversion d'énergie .....	15
Figure I.12 : Principaux composants d'une éolienne .....	16
Figure I.13 : éolienne a axe vertical .....	17
Figure I.14 : éolienne a axe horizontal. ....	18
Figure I.15 : différentes structure d'éoliennes à axe horizontal .....	19
Figure I.16 : Machine synchrone connectée directement au réseau. ....	20
Figure I.17 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance .....	20
Figure I.18: Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents ..	32
Figure I.19 : Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné.....	21
Figure I.20 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe) .....	22
Figure I.21 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable. ....	22
Figure I.22 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation .....	23

## Chapitre II

Figure II.1 Structure du générateur éolien étudié.....	25
Figure II.2 : Spectre de Van der Hoven.....	27
Figure II.3 : Moyenne mensuelles de la vitesse du vent dans la région d'Adrar. ....	28
Figure II.4: Exemples de distribution de Weibull en fonction des différents paramètres .....	28
Figure II.5 : Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent.....	30
Figure II.6 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance .....	31
Figure II.7 : Schéma de bloc de la première modèle de vitesse du vent .....	31
Figure II.8: Vitesse de vent sous Matlab /Simulink. ....	32
Figure II.9: la modèle de RISO Vitesse de vent.....	33
Figure II.10 : Interface de masque pour modèle de vent .....	33
Figure II.11 : Série de temps de vent pour les modèles considérés (ZA - Algorithme - Ziggurat, SB - Built-in Simulink Block). ....	34
Figure II.12 : Histogramme du vent pour les modèles considérés (ZA - Ziggurat Algorithm, SB - Built-in Simulink Block) .....	35
Figure II.13 : Densité des spectres de puissance pour les modèles considérés (ZA - Ziggurat Algorithm, SB - Built-in Simulink Block).....	35
Figure II.14 : Passage de repère triphasé (abc) au diphasé (dq). ....	37
Figure II.15 : Voilure à axe vertical de type Savonius .....	39
Figure II.16 : Courbe caractéristique retenue pour les essais. ....	40
Figure II.17 : Modèle du couple éolien sous Simulink. ....	40
Figure II.18 : La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation .....	40
Figure II.19 : Modèle du couple de la turbine éolienne.....	40
Figure II.20 : Schéma bloc de la turbine éolienne.....	42
Figure II.21 : Schéma de l'association MSAP – redresseur à diode .....	43
Figure II.22 : Modèle R-C de la batterie.....	44
Figure II.23 : Schéma équivalent de $n_b$ éléments en série. ....	44
Figure II.24 : Modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Simulink .....	45

## Chapitre III

Figure III.1: Structure globale de la chaîne de conversion.....	48
Figure III.2 : La vitesse du vent en fonction de temps. ....	49
Figure III.3 : Vitesse de vent.....	49
Figure III.4 : vitesse de vent en fonction de temps .....	50
Figure III.5 : les résultats de la simulation de système éolien. ....	52
Figure III.6 : Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP) .....	52



Figure III.7 : Simulation de la GSAP à vide .....	54
Figure III.8 : Bloc de la simulation de la GSAP en charge .....	55
Figure III.9 : Simulation de la GSAP en charge. ....	58
Figure III.10 : résultat de simulation de génératrice GSAP avec le modèle 1 de vitesse de vent .....	60
Figure III.11 : résultat de simulation de génératrice GSAP avec le modèle 1 de vitesse de vent .....	61
Figure III.12 : résultat de simulation de génératrice GSAP avec le modèle 1 de vitesse de vent .....	63



## NOMENCLATURE

MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents
V	Vitesse du vent en m/s
$V_1$	Vitesse du vent avant le convertisseur
$V_2$	Vitesse du vent après le convertisseur
$V_m$	La vitesse moyenne du vent.
$P_m$	puissance instantanée du vent
$\rho$	la masse volumique de l'air
A	La surface balayée par la turbine
R	le rayon de la voilure
H	Hauteur
$\lambda$	La vitesse spécifique
$C_p$	Le coefficient de puissance de l'éolienne
$\Omega_1$	la vitesse angulaire de rotation des pales en rad/s.
$C_e$	Le couple éolien
J	le moment total d'inertie
$C_f$	le couple de frottement
$C_{em}$	couple électromagnétique développé par le générateur
$\Omega$	La vitesse sur l'arbre du générateur
$f_m$	le coefficient de frottement visqueux dans la machine en N.m.
$J_{gen}$	L'inertie de la génératrice
$J_t$	L'inertie de la turbine
i	Courant
f(V)	La fonction densité de probabilité pour laquelle la vent a une vitesse v
F(V)	La fonction de distribution cumulative de la vitesse v (fonction de répartition de Weibull)
K	Le facteur de forme (sans unité)
C	Le facteur d'échelle (m/s)
B	Distribution de Rayleigh.
$a_k$	Amplitude des harmoniques
$w_k$	Fréquence des harmoniques
$U_{s(abc)}$	tensions des phases statoriques

$i_{s(abc)}$	courants des phases statoriques
$\varphi_{s(abc)}$	Vecteurs flux statoriques des phases a,b et c
$\varphi_f$	C'est la valeur crête du flux crée par l'aimants permanents à travers les enroulements statorique.
$p(\theta)$	Transformation de Park
$i_{dq}$	Courant statoriques sur les axes d et q
$U_{dq}$	Tension statoriques sur les axes d et q
C	la composante homopolaire, direct et quadrature.
P	Le nombre de paires de pôles
$R_s$	la résistance statorique.
$L_{dq}$	l'inductance statorique sur les axes d et q
$k_t$	le coefficient du couple.
$R_i$	une résistance interne.
$E_o$	La tension à vide de la batterie
$U_{cb}$	Tension qui traverse la capacité $C_b$
EDC	l'état de charge de la batterie
$Q_d$	a quantité de charge manquante par rapport à $C_b$
$C_b$	la capacité (Ah) de la batterie.
$I_{bat}$	Courant de batterie
$P_{bat}$	La puissance de batterie
$U_{bat}$	la tension batterie
$n_b$	Nombre des éléments dans la batterie
$E_b$	Source de tension dans la batterie
$U_{bat-dé}$	tension en décharge.
$U_{bat-ch}$	tension en charge.
$\Delta T$	L'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments température=25°C
$C_{10}$	Capacité en Ah de la batterie en régime de décharge a courant constant durant 10h
$\Omega_t$	Vitesse de la turbine
w	Vitesse angulaire en rad/s

## Résumé

Parmi des différentes énergies renouvelables, l'éolien connaît un essor particulièrement important depuis plus de 30 ans. Afin d'optimiser l'exploitation de cette forme d'énergie (par une meilleure intégration dans le réseau et une réduction des coûts de production), la prévision de la ressource, et ainsi de la puissance en sortie d'une ferme éolienne, est donc essentielle. Nous présentons la recherche du modèle mathématique très stable avec un système à un paramètre d'entrée (le vent c'est un paramètre aléatoire) c'est à cette problématique que nous sommes principalement intéressés dans le cadre de cette mémoire. Nous présentons la modélisation et simulation de trois types de modèles de vent différent avec le système complète et choisis le bon modèle.

**Mots clés** : Énergie éolienne, Modélisation de la vitesse du vent, coefficient de puissance, génératrice GSAP.

### المخلص :

من بين كل الطاقات المتجددة ، التربينات الهوائية عرفت انطلاقة مهمة من اكثر من 30 سنة. من أجل تحسين استغلال هذا النوع من الطاقة ( من أجل أحسن تداخل مع شبكة التوزيع الكهرباء و أقل تكلفة للإنتاج) ، توقع الموارد و القدرة التي تخرجها مزرعة التربينات الهوائية ، يكون من المهم البحث على اقرب نمذجة لعامل الادخال (الرياح عامل عشوائي) وهذه الاشكالية التي نود مبدئيا ان نهتم بها في هذه المذكرة. نقدم نمذجة ومحاكاة لثلاثة نماذج مختلفة للرياح مع نظام كامل لاختيار النموذج الافضل. الكلمات المفتاحية : طاقة الرياح ، محاكاة سرعة الرياح ، مولد متزامن ذات مغناطيس دائم ، عامل الإستطاعة

---

# *Introduction générale*

---

### Introduction générale

L'énergie est devenue un élément fondamental à cause de nos différentes exigences en plusieurs termes domestiques et industriels. Ce qui nous incite à réfléchir toujours à de nouvelles techniques de production de cette énergie.

Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Mais le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète et pousse vers un cycle ouvert non renouvelable.

En à peine plus d'un siècle, l'énergie avec l'électricité comme forme moderne a pris une place de premier plan. Sa production couvre le tiers de la consommation énergétique mondiale qui est concentrée principalement dans des machines thermomécanique où la combustion est à sa grande échelle avec l'émission directe de plusieurs millions de tonnes de CO<sub>2</sub> provoquant des degrés élevés de la pollution et de la température ; ainsi que la réduction des réserves naturelles.

Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement à ce moment : qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le bon fonctionnement des aérogénérateurs et leur insertion dans la production électrique.

Poussé par de nouveaux impératifs environnementaux, le domaine de l'énergie éolienne a connu un essor fulgurant ces dernières années. Il s'agit actuellement du secteur énergétique qui présente la plus forte croissance. Le développement et la recherche se font principalement du côté des éoliennes de grande dimension. Ces éoliennes sont regroupées en parcs éoliens, en mer ou sur la terre, et sont reliées aux réseaux de distribution d'électricité. Elles ont des pales mesurant plusieurs dizaines de mètres et une puissance de l'ordre du mégawatt. De l'autre côté du spectre, on retrouve des éoliennes de petite dimension, ayant des puissances allant de 100 watts à quelques dizaines de kilowatts, qui sont destinées à la production en réseau isolé. Elles sont principalement utilisées pour alimenter des installations trop éloignées du réseau de distribution d'électricité [3].

En Algérie, pour le site d'Adrar le potentiel éolien étant très fort alors que le potentiel solaire semble plus satisfaisant. Dans ce mémoire, notre étude s'intéresse à la filière éolienne.

En raison de la nature fluctuante de vent, éolienne ne peut être considérée que comme une source d'énergie de complément. Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne.

Notre travail consiste à étudier un système éolien avec plusieurs modèles de vitesse du vent

Ce mémoire est composée de trois chapitres :

- Une généralité sur les systèmes éoliens est présentée dans le premier chapitre.
- Dans le second chapitre, nous allons faire à la modélisation des trois types de vitesse du vent et la modélisation des autres parties du système éolien global.
- Dans le troisième chapitre, nous exposons l'ensemble des résultats obtenus de simulation numérique avec l'interprétation.

Enfin, les principaux résultats de ce travail de recherche et les perspectives qui en résultent sont donnés ainsi qu'une conclusion générale.



---

*chapitre I*  
*Etat de l'art du système éolien*

---

## **I.1 Introduction**

Les sources renouvelables d'énergie, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance, la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou installations isolées.

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique), [1].

## **I.2 Génération d'énergie renouvelable**

Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, géothermie, ..) [3], [4].

### **I.2.1 Génération de la chaleur**

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (sources conventionnelles, sources renouvelables). Une description quelques sources renouvelables sont proposées ci-dessous.

#### **I.2.1.1 Thermo solaire**

L'énergie solaire thermique est une énergie renouvelable qui a pour principe de convertir en chaleur le flux solaire par le biais de capteurs solaires thermique. Cette énergie peut être utilisée pour le chauffage, mais également pour produire l'électricité.

L'énergie solaire thermique est également utilisée dans des installations solaires thermodynamiques, fours solaires, ou cheminées solaires [6].

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent [4], [5].



**Figure I.1: centrale solaires thermique [7]**

### **Géothermie**

L'énergie géothermie est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité, [7].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer.

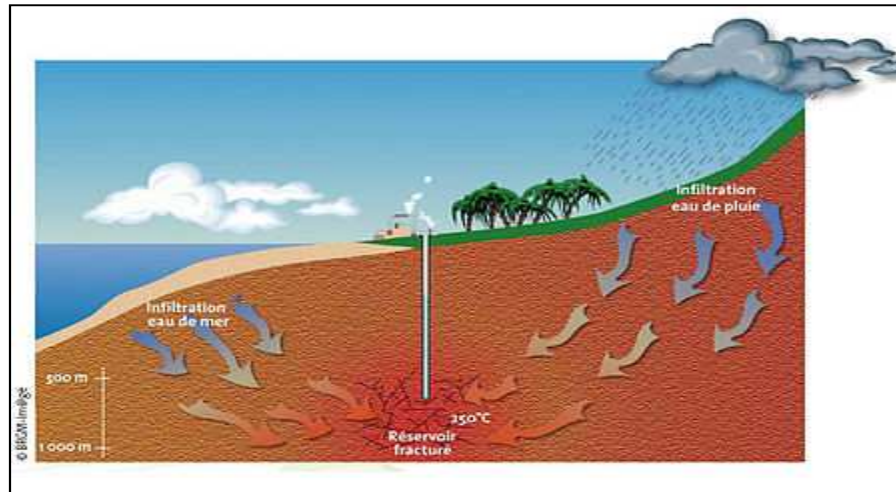


Figure I.2 : Le principe d'énergie géothermique, [7]

### I.2.1.2 Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement[1], La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1% de la production d'électricité mondiale [2].

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir.

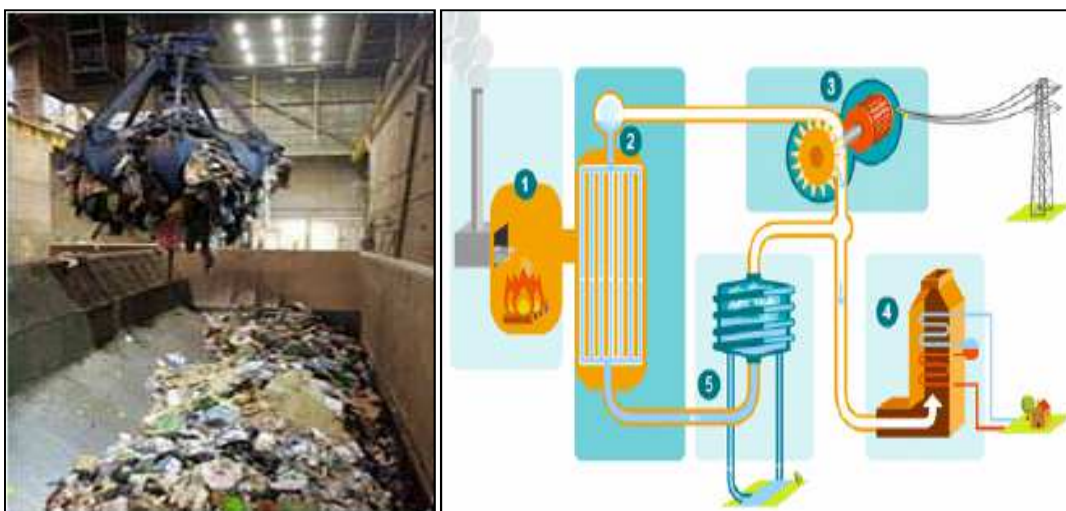


Figure I.3 : La production d'énergie par la biomasse [7].

## I.2.2 Génération d'électricité

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes.

### I.2.2.1 Hydraulique :

L'eau, comme l'air, est en perpétuel mouvement. Par rapport à l'air, sa densité plus importante en fait un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et « stockable », [1].

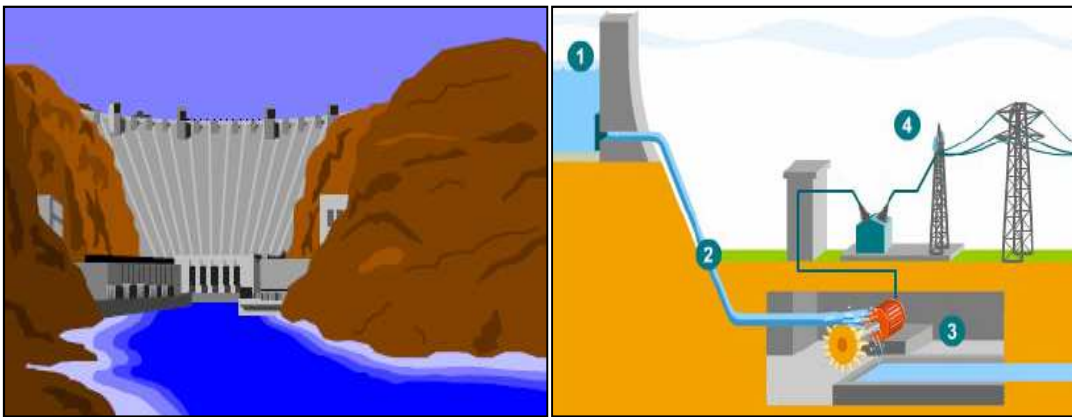


Figure I.4 : Centrale hydraulique [7]

### I.2.2.2 Photovoltaïque

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. L'énergie solaire photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production.

L'avantage des cellules photovoltaïques réside dans la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, et dans leur souplesse d'utilisation qui les rend utilisable notamment dans les pays en voie de développement qui ne dispose pas de réseau électrique important. Cependant, leur rendement reste faible [5].

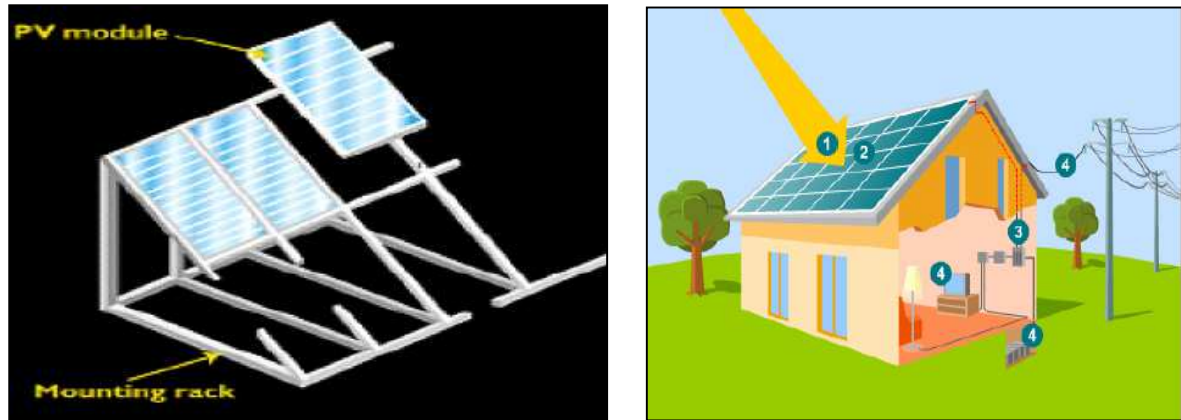


Figure I.5 : La production d'énergie par des cellules photovoltaïques

### I.2.2.3 L'Eolien

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [2]. Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte [4].

**Direct :** Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin,

**Indirect :** Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

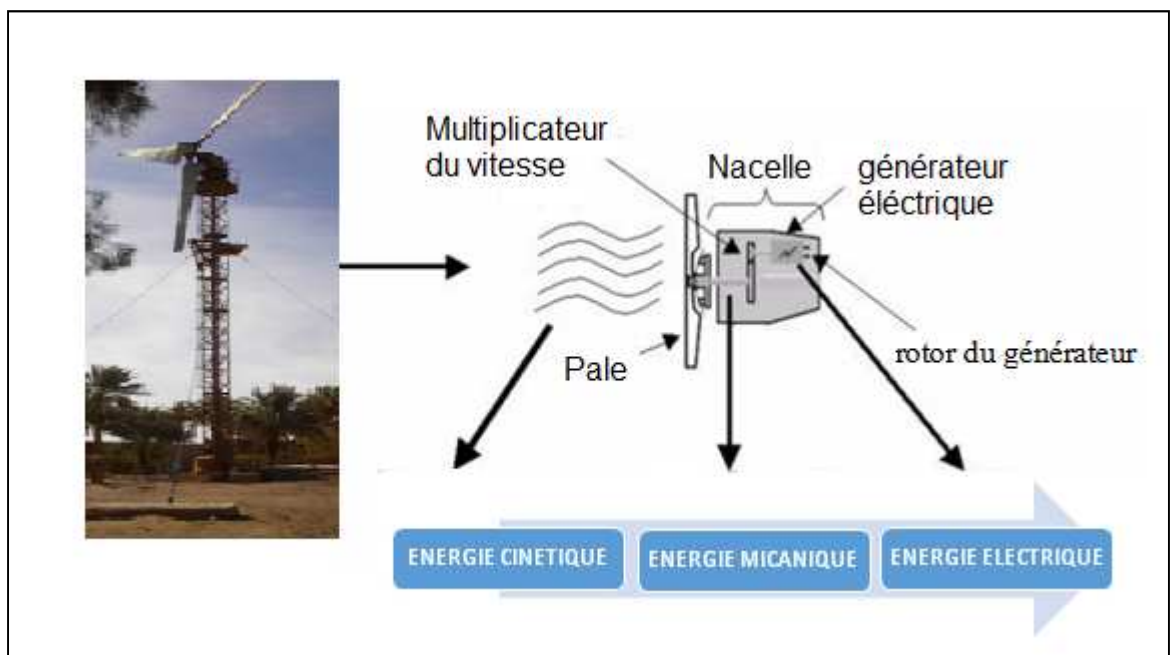
### I.3 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant

exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [8].

#### I.4 Définition de l'énergie éolienne:

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur (Figure (I-7)), [9].



**Figure I.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent**

Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

L'éolienne se compose d'une nacelle, d'un mât, de pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant



prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible) .

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores [9].

### **I.5 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne**

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable.

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité .

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985.

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW, [10].

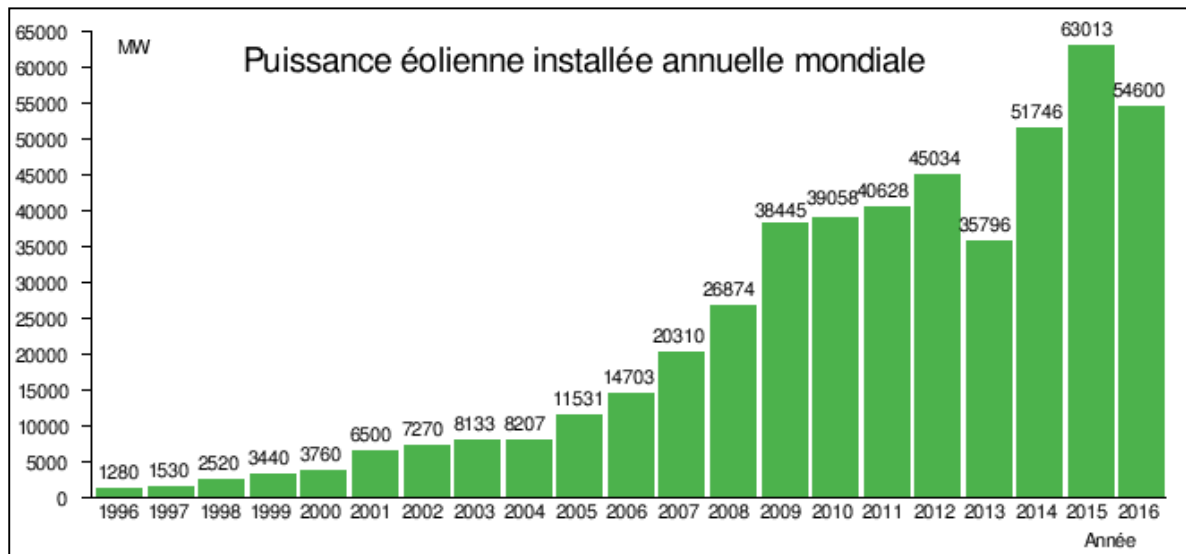


## I.6 L'énergie éolienne en quelques chiffres :

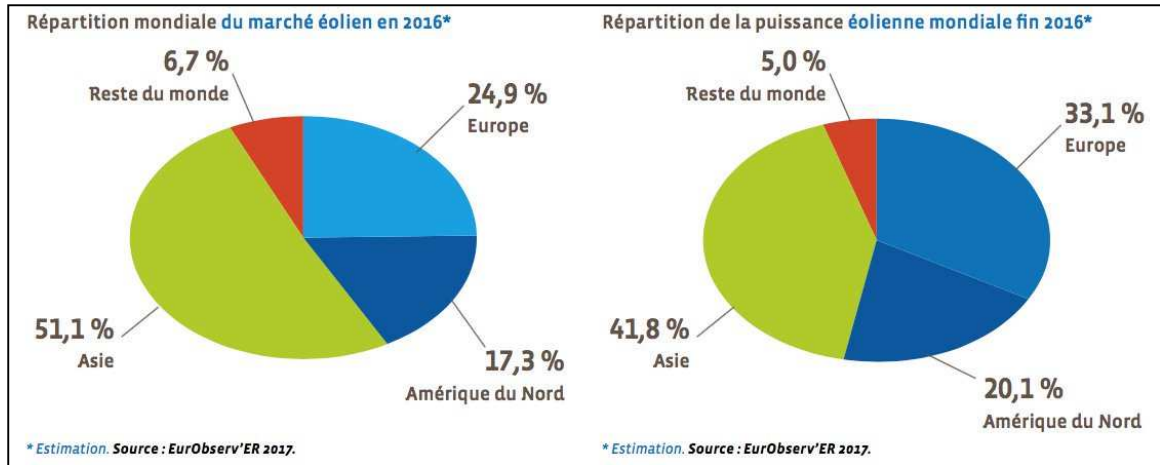
### I.6.1 Données Chiffrées sur l'éolien

À la fin 2016, le total mondial de la puissance installée éolienne atteignait 486,7 GW (432,7 GW fin 2015), en augmentation de 54,6 GW en un an contre +63,0 GW en 2015, soit +12,6 % après +17 % en 2015, +16,2 % en 2014 et +12,4 % en 2013). La Chine a installé à elle seule 23,3 GW, soit 42,7 % du total 2016 (48,4 % en 2015, 45,2 % en 2014), et représente 34,7 % du parc mondial fin 2016 contre 33,6 % fin 2015 et 31 % fin 2014g 1. En 2016, le marché éolien mondial a ralenti sa croissance avec 54 GW installés dans l'année (figure I-7)

La répartition de la puissance mondiale en fonctionnement se resserre un peu plus entre l'Asie et l'Europe (figure I.8), mais Asie grande encore l'avantage (une part de 41.8% contre 33,1%), l'Amérique du Nord ne se laisse pas distancer et représente près du quart (20,1%) de la puissance éolienne installée dans la monde.



**Figure I.7 : puissance éolienne installée annuelle dans le monde depuis 2001 (en MW), [7].**



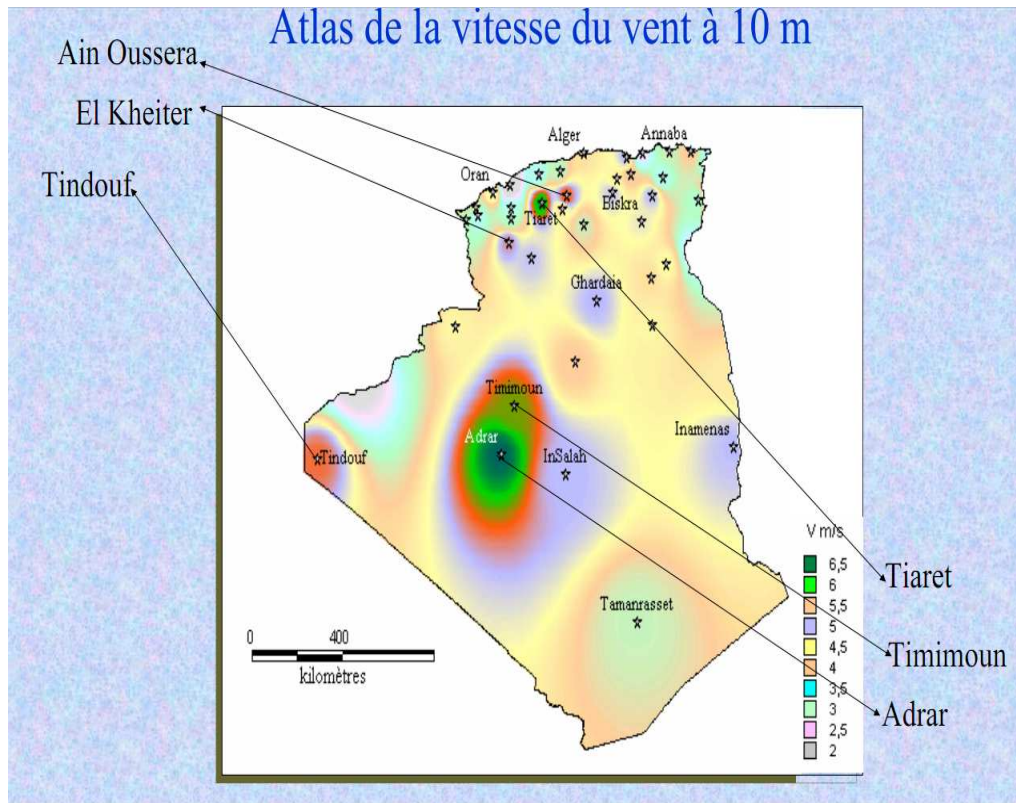
**Figure I.8 : Répartition mondiale du marché (à gauche) et la puissance (à droite) éolienne en 2016**

### I.6.2 L'éolienne en Algérie :

Selon quelques évaluations, plus de cinq millions d'algériens ne sont pas raccordés au réseau d'électricité, alors que beaucoup de communautés rurales ont besoin d'eau potable et d'eau pour irrigation. Ces besoins ruraux représentent un marché potentiel pour des technologies d'énergie renouvelable.

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du problème qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030 [11].

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar [10].



**Figure I.9 : présente la carte des vents en Algérie, [19].**

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes :

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- et quatre zones en sites sahariens

### **I.6.3 Projet à faire en l'Algérie**

Il est clair donc que l'énergie éolienne constitue un second axe des développements des énergies renouvelables en Algérie, (après le solaire). Dans ce cadre la wilaya d'Adrar a bénéficié, à la faveur d'un partenariat algéro-français, d'un projet de ferme de 12 éoliennes de 850 kW chacune, localisée dans la zone de Kabertene (80 km au nord d'Adrar). Les éoliennes fournies par l'Espagnol Gamesa délivrent leurs 10 MW de puissance à la vitesse de 8 m/s du vent. Ces éoliennes sont connectées au réseau de transport. Par ailleurs, des études seront menées pour identifier les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2020. A cet effet, ce programme consiste en l'acquisition de 10 stations de mesure météorologique [11].



**Figure I.10 : la ferme éolienne à Adrar [11]**

Le potentiel éolien, technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007.

Les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an.

La figure (I.9) présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne.[10]

## **I.7 Constitution d'une éolienne**

### **I.7.1 Principe de fonctionnement :**

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes.

1- La transformation de l'énergie par les pales : Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

2- L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur. Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur.

3- La production d'électricité par le générateur L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

4- Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur.

5- L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure (I-11) L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [10].

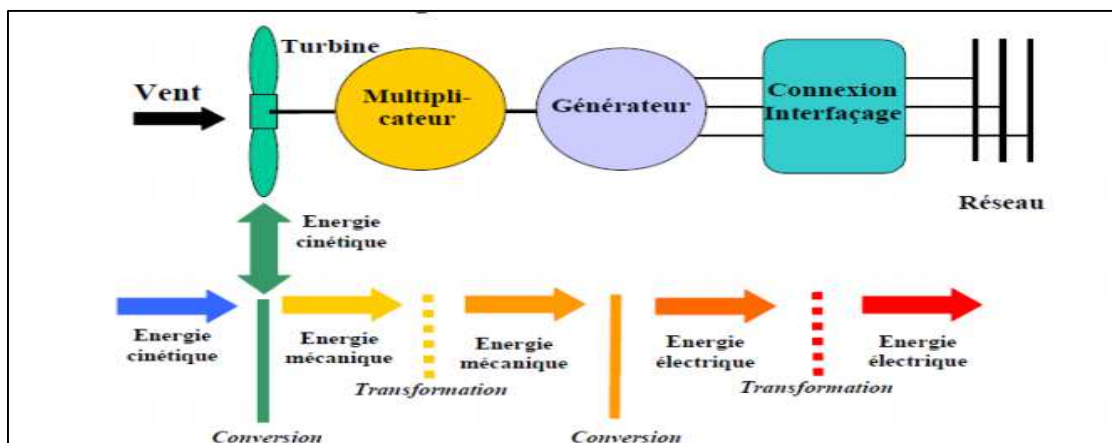


Figure I.11 : Principe de la conversion d'énergie, [10]

## I.7.2 Constitution:

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux [12], [13], [14]:

### I.7.2.1 Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

### I.7.2.2 La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de

commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

### **I.7.2.3 Le rotor**

Il est formé par les **pales** assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées ; actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique. L'augmentation du diamètre du rotor va accroître la masse des pales.

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable, [8].

#### **I.7.2.3.1 Les rotors à vitesse fixe**

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

Ce système allie ainsi simplicité et faible coût [8].

#### **I.7.2.3.2 Les rotors à vitesse variable**

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées, [8].

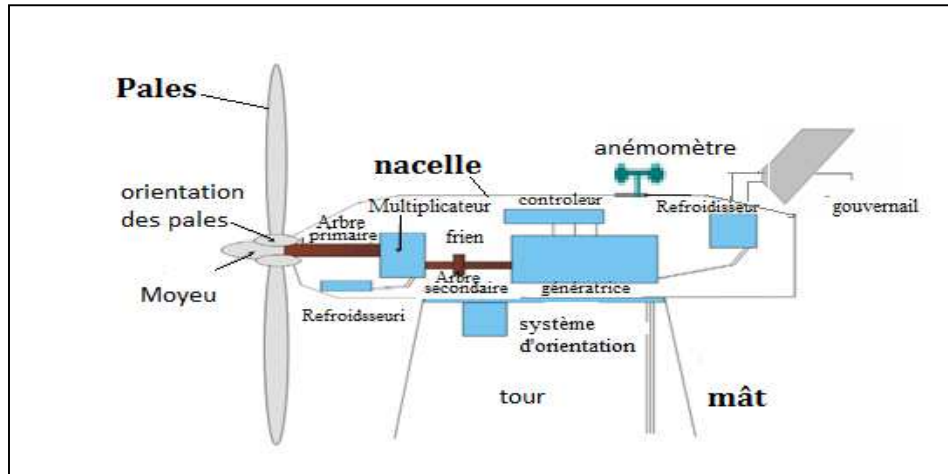


Figure I.12 : Principaux composants d'une éolienne

### I.8 Les différents types des turbines éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. On peut diviser les éoliennes en deux grandes familles [8] :

- les éoliennes à axe vertical
- les éoliennes à axe horizontal

#### I.8.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne (figure (II-13)) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplication et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal, [8].





**Figure I.13 : éolienne a axe vertical [8]**

### **I.8.2 Les éoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal (figure (II-14)) beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [8].

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pales.



**Figure I.14 : éolienne a axe horizontal [8].**

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

- Eoliennes de petite puissance : inférieur à 40 W.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieur à 1 MW.



A titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [8].

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

Tableau (I-1) : classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [8].

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal [12]:

#### I.8.2.1 Structure en Amont :

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

#### I.8.2.2 Structure en Aval :

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

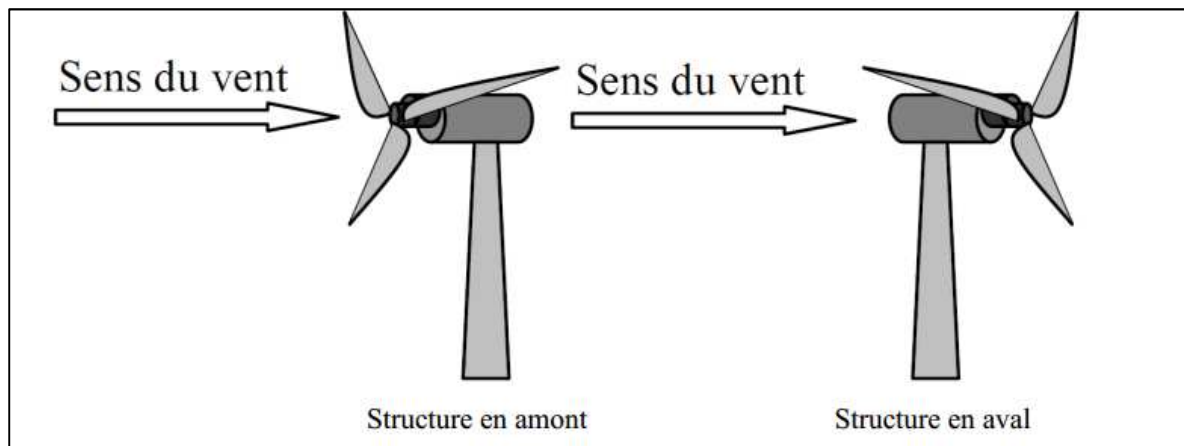


Figure I.15 : différentes structure d'éoliennes à axe horizontal [12].

### I.9 Types des machines électriques dans les systèmes éoliennes :

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones [9].

### I.9.1 Générateur synchrone

C'est le type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure (II-16)), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure (II-17)).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de s'en passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance [9].

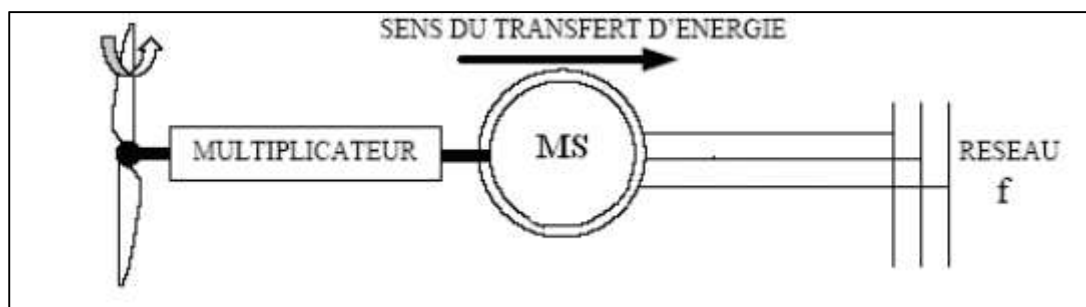
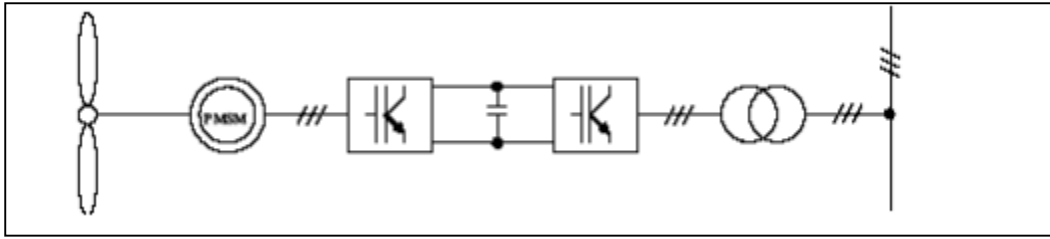


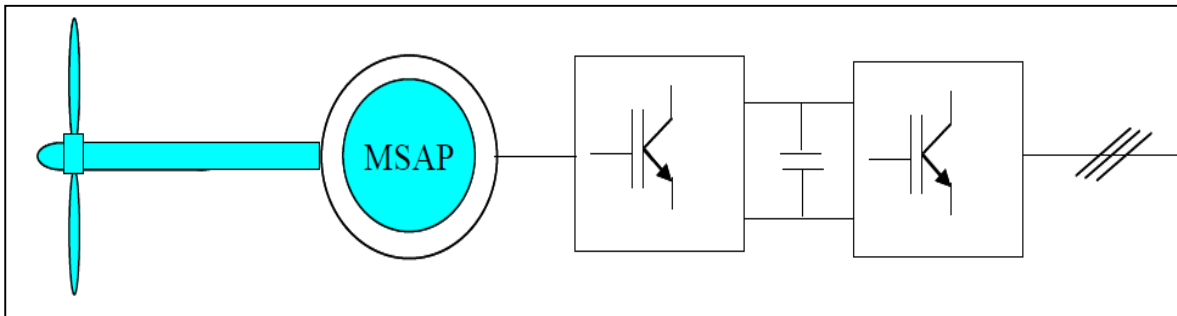
Figure I.16 : Machine synchrone connectée directement au réseau [9].



**Figure I.17 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance**

### I.9.1.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.



**Figure I.18: Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents**

### I.9.1.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [14].

On trouve également des machines synchrones associées à un multiplicateur de vitesse. Ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent sur un redresseur commandé, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau.

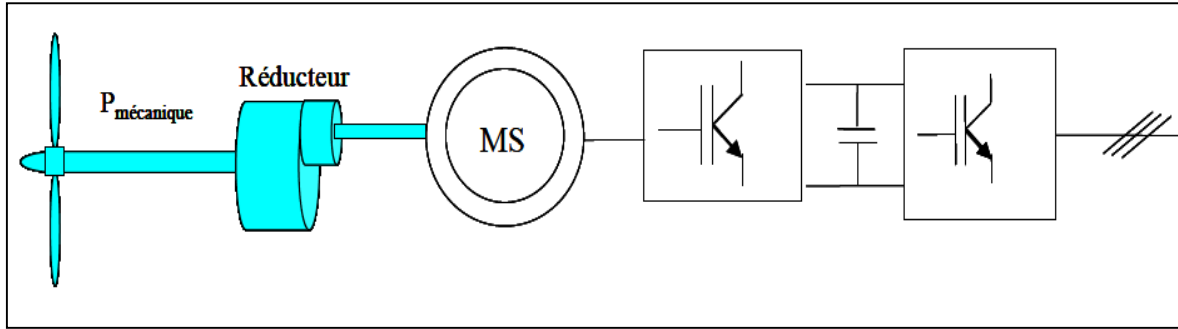


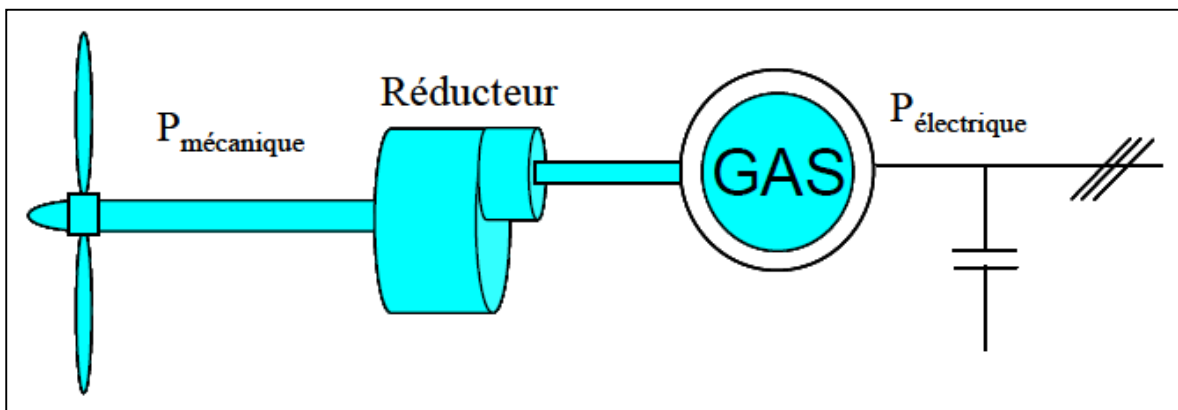
Figure I.19 : Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné

## I.9.2 Générateur Asynchrone

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

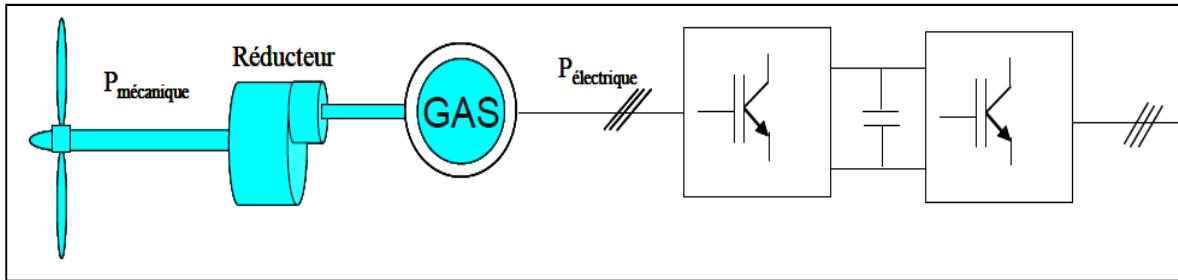
### I.9.2.1 Génératrices asynchrones à cage

C'est dans les grandes puissances que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire [17]. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse [4].



**Figure I.20 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)**

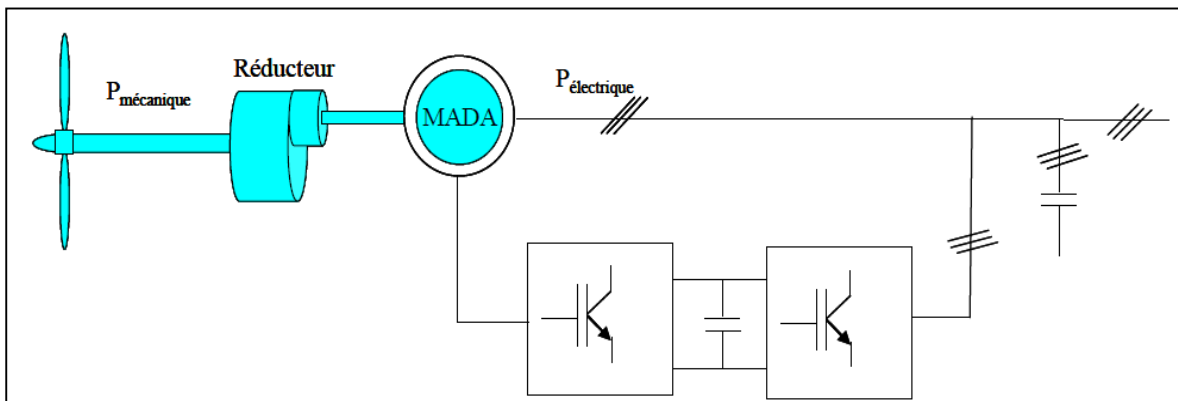
Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée [17].



**Figure I.21 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.**

### I.9.2.2 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté. Dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur, qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor [13], [18].



**Figure I.22 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation**

### **I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après [10].

#### **I.10.1 Avantages**

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- L'énergie éolienne est une énergie propre, Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO<sub>2</sub>.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie risqué comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires.
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite.
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et ils se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte.
- 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.

#### **I.10.2 Inconvénients**

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées ;

- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.

### **I.11 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art décrivant tout d'abord les notions général sur les différentes sources énergétiques renouvelables à faible pollution environnementale, Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Les caractéristiques de plusieurs types des machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs ainsi que leurs avantages et inconvénients.

---

*chapitre II*  
*Modélisation du vent et le*  
*système éolienne*

---



## II.1 Introduction

La vitesse du vent est la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne. C'est donc une variable importante à modéliser et la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

La variation de la vitesse du vent est aléatoire, ce qui entraîne des caractéristiques fluctuantes. Ainsi, dans le but de reproduire ces caractéristiques, il existe deux possibilités qui sont les mesures expérimentales et la modélisation analytique, [20].

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 vitesse du vent avec la chaîne de conversion globale [1].

La figure (II-1) ; montre la chaîne complète de conversion d'énergie éolienne avec toutes les composants qui seront modélisés dans ce chapitre. On s'intéresse exactement au premier composant qui le vent avec plus détail sur la distribution et les caractéristiques.

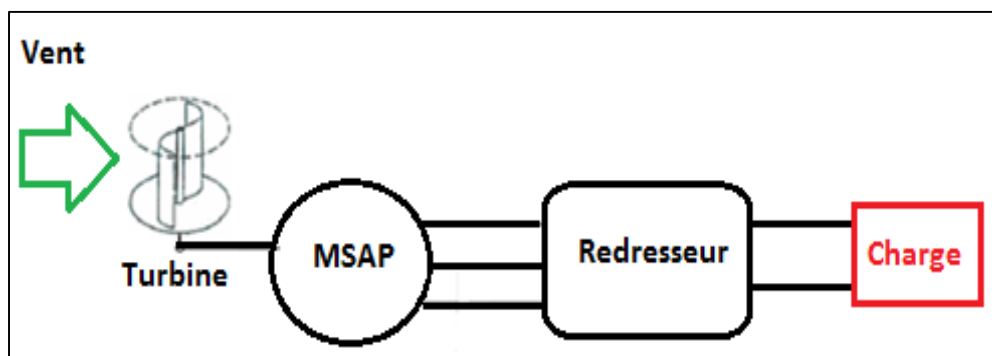


Figure II.1 Structure du générateur éolien étudié, [21].

## II.2 Distribution et caractéristique de vent :

### II.2.1 Variations temporelles du vent : l'aléa éolien

Localement, le vent manifeste le plus souvent une instabilité en vitesse et en direction. Ces variations doivent s'analyser selon différentes échelles de temps :

- Variations inter-annuelles : observées d'une année sur l'autre, ces variations peuvent traduire un supplément ou un déficit de ressource éolienne sur la période.
- Variations intra-annuelles ou saisonnières : traduisent l'évolution normale ou parfois inhabituelle de la ressource éolienne en fonction de la saison pour la région ou le site en question.

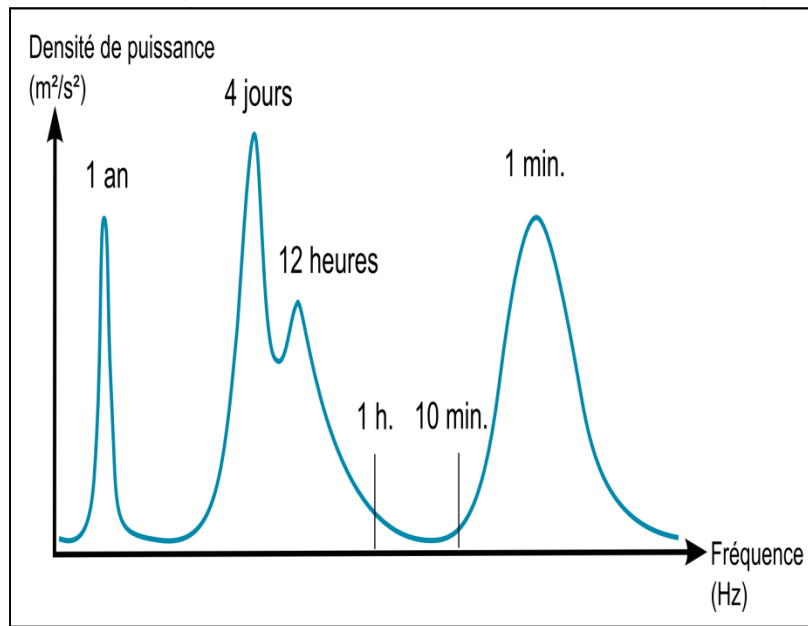
- Variations intra-journalière : caractérisent les écarts de la ressource éolienne, en particulier, entre les périodes diurne et nocturne. Au bord de mer, ces variations sont caractéristiques du phénomène d'inversion thermique.
- Variations à l'échelle de la minute ou d'une dizaine de secondes : il s'agit des régimes transitoires, des rafales de vent plus ou moins fortes qui peuvent apparaître sur le site. Les rafales caractérisent notamment le niveau de turbulence du site.

Habituellement, lorsque l'on parle de vitesse du vent, sous-entendu instantanée, il s'agit de moyennes sur 10 minutes. De façon simpliste, la vitesse moyenne annuelle permet d'évaluer la productivité annuelle d'un site sans se préoccuper de la variabilité, alors que des profils temporels, à l'échelle de l'heure, de la journée voire des saisons, permettent de mieux évaluer les besoins de traitement de cette variabilité en la rapprochant des autres actifs de production composant le système électrique (centrales de production d'électricité flexibles ou dispatchables, comme des installations hydrauliques de barrage ou des groupes thermiques à combustible, ou encore des systèmes de stockage), [30].

### II.2.2 Les caractéristiques du vent :

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une année à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Ces fluctuations étant influencées par le déplacement des masses d'air en altitude, mais également par le relief, le type de recouvrement du sol et la stabilité thermique de l'atmosphère. Le vent varie en direction et en intensité, [22]. Pour la production en site isolé mais également pour les aérogénérateurs sont couplés au réseau, il est nécessaire de connaître les statistiques de vitesse du vent tout au long de l'année. Cela requiert une caractérisation préalable des sites sur au moins une année et une mise à jour continue des bases de données [23].

L'analyse spectrale de la vitesse du vent dans la couche limite turbulente permet de mettre en évidence plusieurs échelles temporelles de fluctuation. La figure (II-2) montre l'allure d'un spectre de densité de puissance représentatif de la vitesse horizontale du vent à 100 mètres au-dessus du sol d'après Van der Hoven.



**Figure II.2 : Spectre de Van der Hoven**

On constate qu'une partie importante de l'énergie est concentrée sur une période de l'ordre de la minute, correspondant à l'échelle des mouvements turbulents. On observe également un trou d'énergie pour des périodes comprises entre 10 minutes et une heure. Par conséquent, sur une période incluse dans ce trou d'énergie, la vitesse du vent pourra être localement considérée comme un processus stationnaire. On pourra alors considérer la vitesse du vent comme la somme d'une composante moyenne et d'une composante fluctuante [24].

### II.2.3 Analyse des données de la vitesse moyenne du vent

La vitesse moyenne du vent est le plus simple indicateur de la qualité des ressources éoliennes d'une région. Les moyennes mensuelles de la vitesse du vent et sont présentées, sur les figures (II-3).

La figure II.3 montre la variation de la moyenne mensuelle de la vitesse du vent pour le site d'Adrar. Cette figure montre que ce site présente un maximum de vitesse moyenne des vents pendant la période Mars-Aout. Quant au minimum, il se produit durant la période Septembre-octobre. Ainsi, les données montrent que le site d'Adrar est un site venté durant toute l'année. En effet, le vent souffle à une vitesse supérieure à 5 m/s durant toute la journée et cela seulement à 10 m du sol [25].

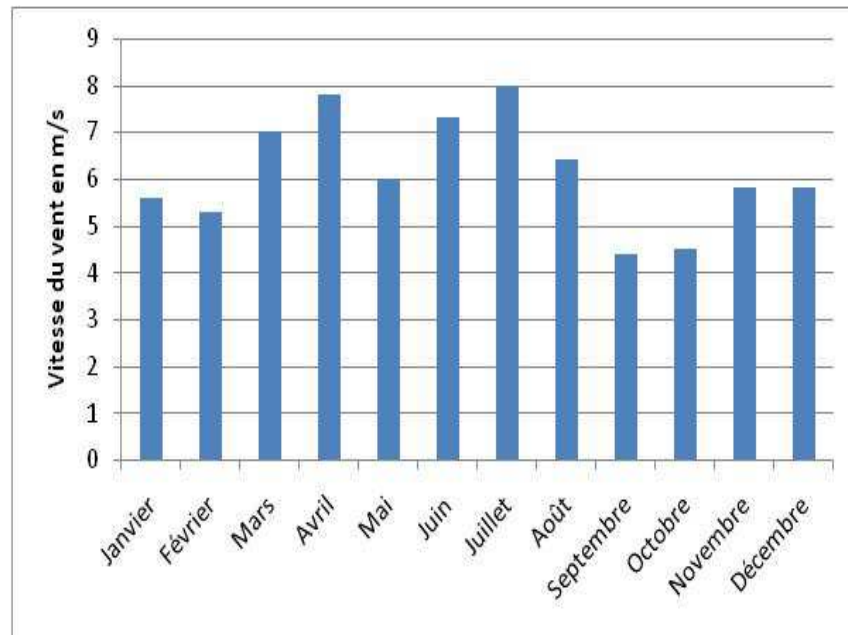


Figure II.3 : Moyenne mensuelles de la vitesse du vent dans la région d'Adrar [23].

#### II.2.4 Distribution statistique :

D'une éolienne pour un site donné. La distribution statistique la plus utilisée pour présenter la distribution du vent sur une longue période est la distribution de Weibull (équation (II-1)). La distribution de Weibull est une distribution qui a deux paramètres, un paramètre de forme  $k$  et un paramètre d'échelle  $C$ . Elle offre ainsi plus de flexibilité pour représenter la distribution du vent d'un site spécifique que la distribution normale, d'autant plus qu'il apparaît que la distribution du vent n'est pas symétrique, comme la distribution normale mais présente généralement davantage de vents faibles que de vents forts. La distribution de Rayleigh, une distribution particulière de Weibull avec  $k = 2$ , est fréquemment utilisée. Elle n'a ainsi qu'un seul paramètre, soit le facteur d'échelle. La figure (II-4) présente Exemples de distribution de Weibull en fonction des différents paramètres, [22].

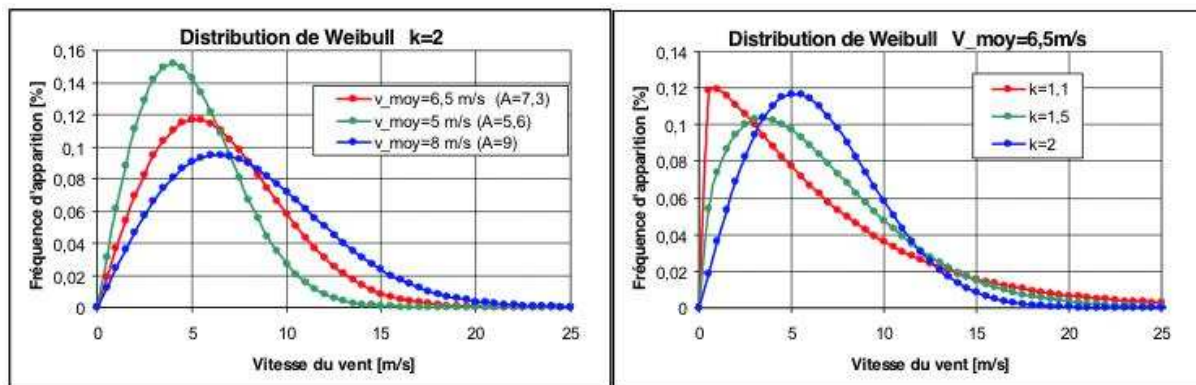


Figure II.4: Exemples de distribution de Weibull en fonction des différents paramètres

[30]

Dans cette distribution, les variations de la vitesse du vent sont caractérisées par deux fonctions : la fonction densité de probabilité et la fonction de répartition. La fonction densité de probabilité  $f(V)$  indique la fraction de temps (ou la probabilité) pour laquelle le vent a une vitesse  $V$ .

$$f(V) = \frac{K}{C} \times \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad (\text{II-1})$$

Avec  $k$  le facteur de forme (sans unité) et  $C$  le facteur d'échelle (m/s).

La fonction de distribution cumulative de la vitesse  $V$  ou encore fonction de répartition de Weibull  $F(V)$  nous donne la fraction de temps (ou la probabilité) pour laquelle la vitesse du vent est inférieure ou égale à  $V$ .

$$F(V) = \int_0^V f(V) dV = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad (\text{II-2})$$

La vitesse moyenne du vent selon la distribution de Weibull s'obtient par la formule suivante

$$V_m = \int_0^V V \times f(V) dV \quad (\text{II-3})$$

La distribution de Weibull s'avère appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent [26]

#### II.2.4.1 Détermination des paramètres de Weibull [2,3]:

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer  $K$  et  $C$  à partir d'une distribution de vent donnée:

$$(\text{II-4})$$

$$(\text{II-5})$$

$$(\text{II-6})$$

Cette fonction densité de probabilité s'appelle la distribution de Rayleigh, lorsque  $K=2$  [27].

#### II.2.5 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale  $P_n$  qui est obtenue à partir d'une vitesse nominale du vent  $V_n$ . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_n$  la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante, [2].

A côté de la vitesse nominale  $V_n$ , on spécifie aussi :

- la vitesse de démarrage,  $V_d$  à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- la vitesse maximale du vent,  $V_M$ , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement, [2].

Les vitesses  $V_n$ ,  $V_d$  et  $V_M$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Figure (II-5)) :

- la zone I, où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas).
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V$ .
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance  $P$  fournie reste égale à  $P_n$ .
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

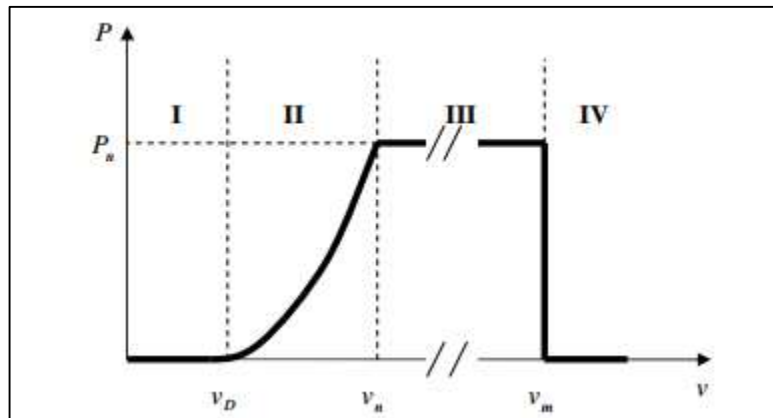


Figure II.5 : Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent [2].

### La caractéristique $CP(\lambda)$ :

Est directement lié à l'aérodynamisme des pales. La Figure (II-6) nous montre l'évolution de la caractéristique d'une éolienne en fonction de  $\beta$ . Plus l'angle de calage sera important, moins la turbine captera l'énergie cinétique du vent. Les pales sont face au vent pour des vents faibles afin d'en extraire le maximum de puissance puis lorsque le vent nominal  $v_n$  est atteint elles s'inclinent pour atteindre la position «drapeau» à la vitesse de vent maximale.

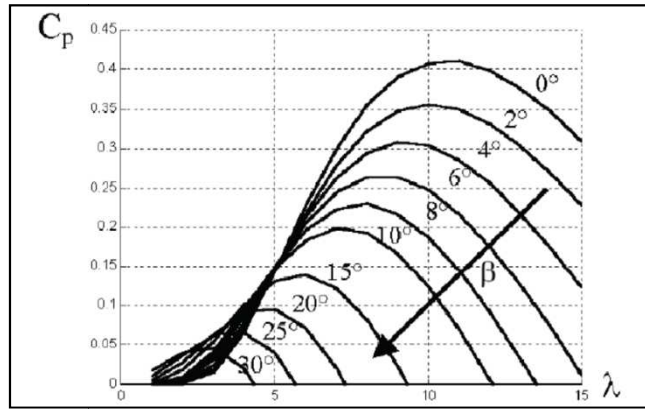


Figure II.6 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance

### II.3 Les modèles de vitesse du vent proposés

#### II.3.1 La première modèle

Des différentes approches utilisées dans la littérature pour la génération d'une série synthétique de vent, dans notre cas, la vitesse de vent sera modélisé par une somme de plusieurs harmoniques, [33]:

$$V(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k \cdot t) \quad (\text{II-7})$$

$a_k$  : Amplitude des harmoniques

$\omega_k$  : Fréquence des harmoniques

La vitesse du vent est représentée par la fonction :

$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{II-8})$$

Schéma de bloc de la 1<sup>ère</sup> modèle de vitesse du vent donné par la figure suivant :

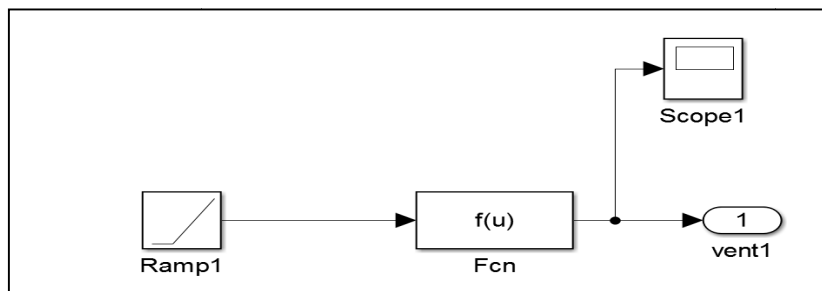


Figure II.7 : Schéma de bloc de la première modèle de vitesse du vent

#### II.3.2 La deuxième modèle

En fonction de la position du commutateur manuel présent dans le schéma, la vitesse du vent est considérée soit comme une vitesse qui présente une composante de turbulence. Cette composante de turbulence est générée par le filtrage d'un bruit pseudo aléatoire.

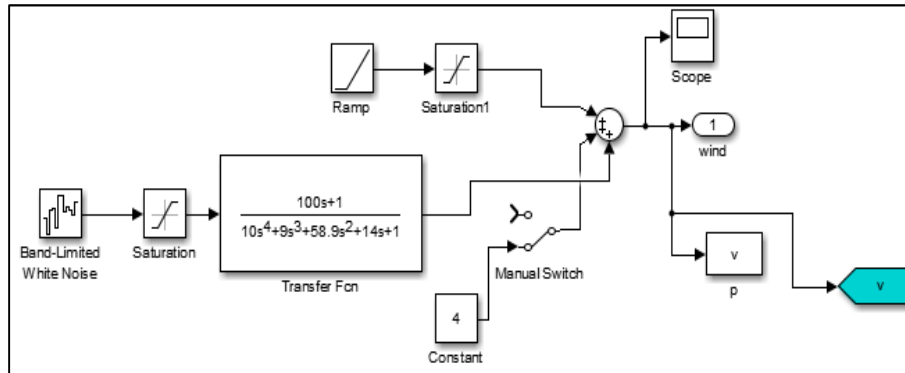


Figure II.8: Vitesse de vent sous Matlab /Simulink.

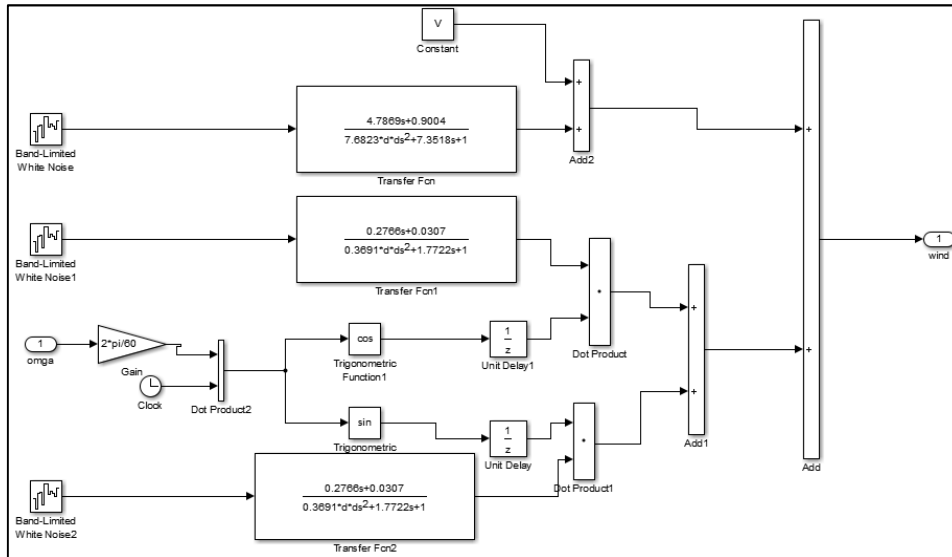
### II.3.3 La troisième modèle

Ce modèle de vent a été développé à **RISO** Laboratoire national Basé sur les spectres de Kaimal. La vitesse du vent est calculée comme une valeur moyenne de la vitesse du vent à point fixe sur tout le rotor, et il prend en compte l'ombre de la tour et les turbulences de rotation.

Une composante principale du modèle est le générateur de bruit blanc normalement distribué. Par conséquent, afin d'obtenir les mêmes séries de temps de vent dans tous les outils de simulation utilisés dans la plateforme de simulation, certaines études ont été faites. Il a été constaté que le générateur de bruit blanc intégré à partir de différents outils de simulation utilisait un algorithme différent et donc une série temporelle différente de vent est obtenue. Un nouveau générateur de bruit blanc normalement distribué a été implémenté en utilisant S-Function sur l'Algorithme de Ziggurat développé par G. Marsaglia, [31].

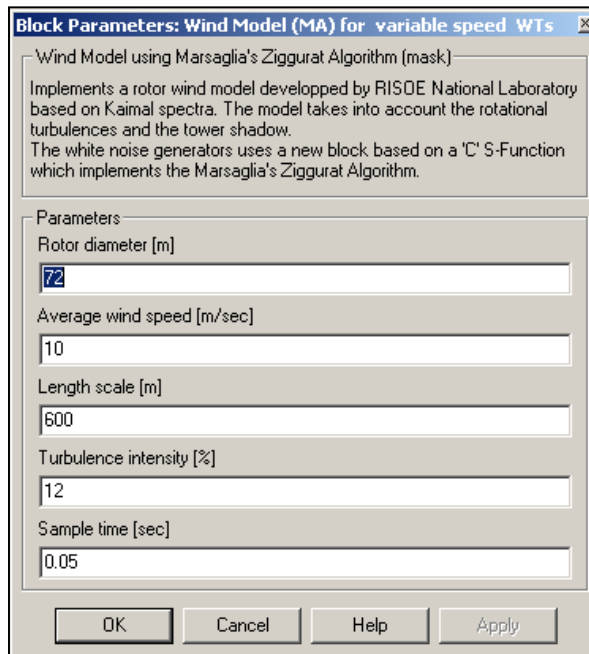
Actuellement, le modèle de vent est disponible en deux versions de base. Le premier utilise le générateur de bruit blanc Matlab / Simulink normalement distribué, tandis que le second est basé sur le nouveau générateur de bruit blanc distribués développés normale. La structure générale de ces modèles Simulink est illustrée dans la Figure (II-9), [31]





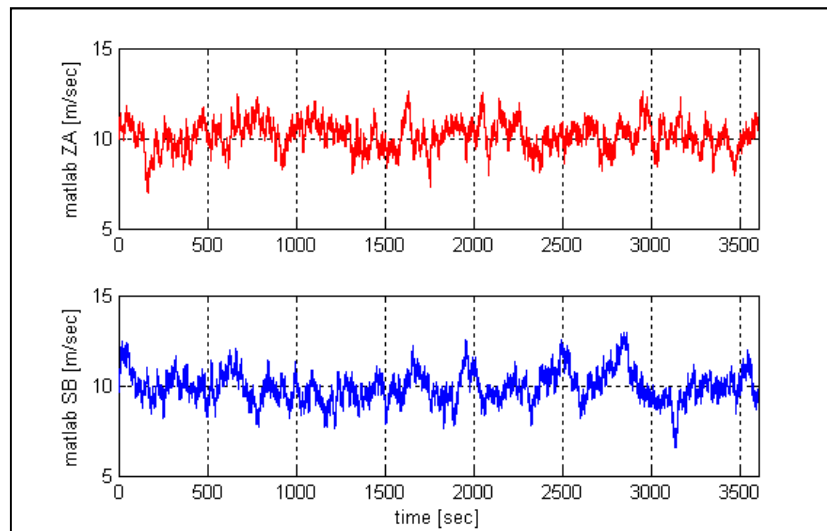
**Figure II.9: la modèlè de RISO Vitesse de vent**

Les paramètres définis dans le masque de bloc sont : le diamètre du rotor de l'éolienne, la vitesse moyenne du vent, l'échelle de longueur, l'intensité de la turbulence et le temps d'échantillonnage comme indiqué dans la Figure (II-10), [31].



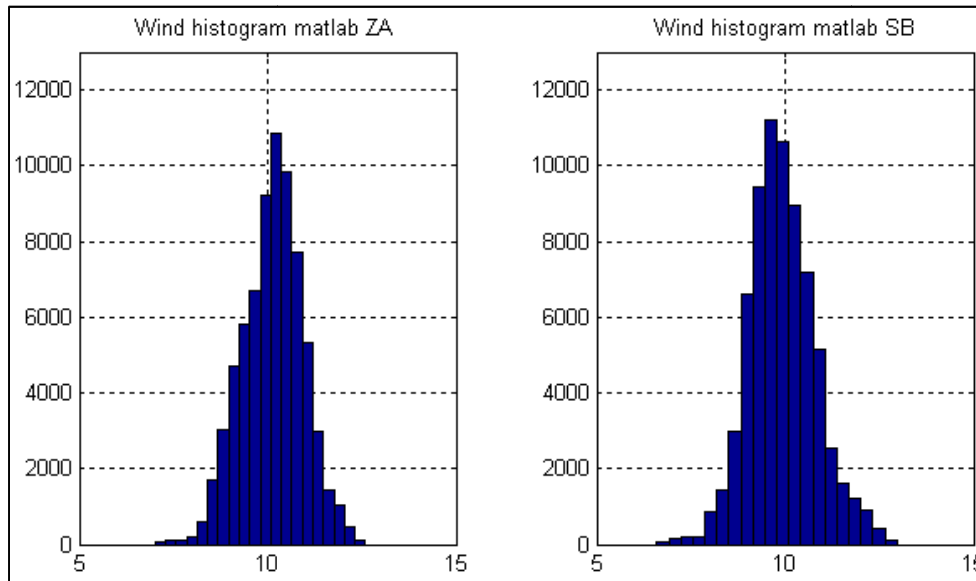
**Figure II.10 : Interface de masque pour modèlè de vent**

Afin de valider le nouveau modèlè de gènérateur de bruit blanc, certaines comparaisons ont été faites. Une série de temps de vent pour 3600 secondes de blanc, un temps d'échantillonnage de 0,05 sec, une vitesse de vent moyenne de 10 m / s et une intensité de turbulence de 12% a été gènéérée pour les deux modèlès comme indiqué dans la Figure (II-11), [31]



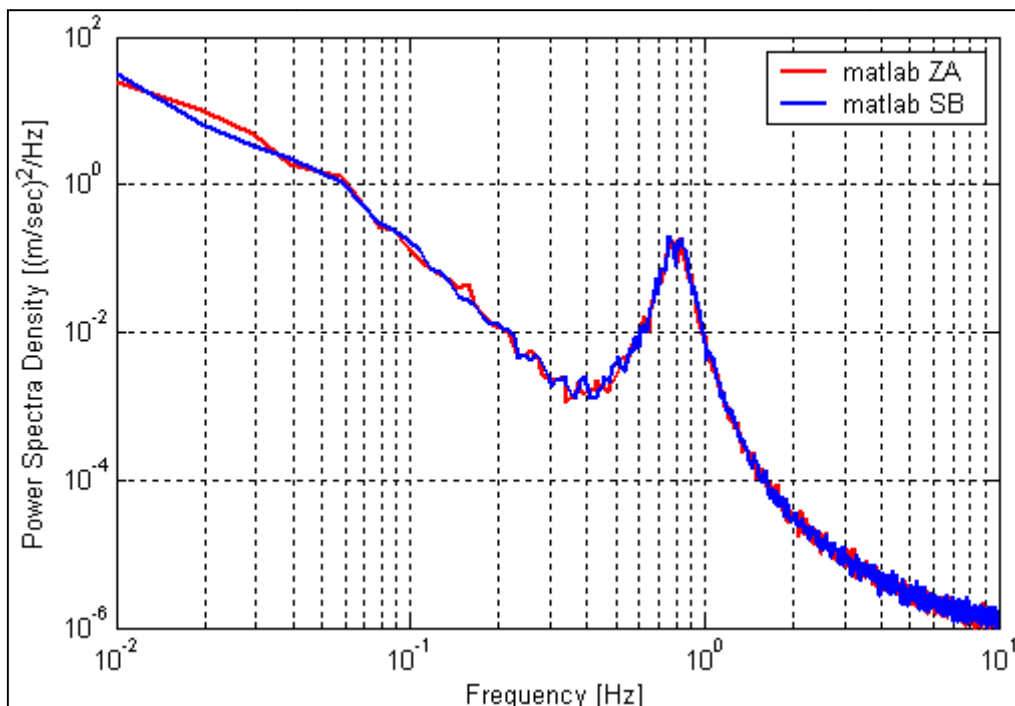
**Figure II.11 : Série de temps de vent pour les modèles considérés (ZA - Algorithme - Ziggurat, SB - Built-in Simulink Block).**

Les histogrammes de la largeur du piège pour ces séries temporelles de vent sont indiqués dans Figure II.12.



**Figure II.12 : Histogramme du vent pour les modèles considérés (ZA - Ziggurat Algorithm, SB - Built-in Simulink Block)**

Enfin, la densité spectrale de puissance pour les deux séries temporelles de vent a été calculée comme représenté sur Figure II.13.



**Figure II.13 : Densité des spectres de puissance pour les modèles considérés (ZA - Ziggurat Algorithm, SB - Built-in Simulink Block)**

Même si les séries temporelles de vent pour les modèles considérés ne sont pas identiques, comme le montrent dans la Figure (II-11) la densité spectrale de puissance est approximativement la même, ce qui est une question importante, [31].

#### II.4 Modèle de la machine synchrone :

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices [21]

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

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

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

Avec:

$R_s$  : La résistance des phases statoriques.

$[U_{sa} \ U_{sb} \ U_{sc}]^T$  : Les tensions des phases statoriques.

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$  : Les courants des phases statoriques.

$[\Phi_{sa} \ \Phi_{sb} \ \Phi_{sc}]^T$  : Les flux totaux à travers les bobines statoriques, [10].

Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer. Les expressions des flux mutuels inducteur-phase sont données par :

$$\varphi_a = \varphi_f \cos(P\theta) \quad (\text{II-10})$$

$$\varphi_b = \varphi_f \cos\left(P\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-11})$$

$$\varphi_c = \varphi_f \cos\left(P\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II-12})$$

$\varphi_f$  : C'est la valeur crête du flux créé par l'aimants permanents à travers les enroulements statorique, [11].

### II.4.1 Equations de MSAP dans le plan de Park:

Afin de simplifier l'étude, on utilise la transformation de Park qui est un outil mathématique permettant de transformer les axes magnétiques des bobines statoriques (a, b, c) axes orthogonaux (d, q). Ce qui se traduit par le remplacement des bobinages statoriques (a, b, c) par des bobinages équivalents (d, q), [11].

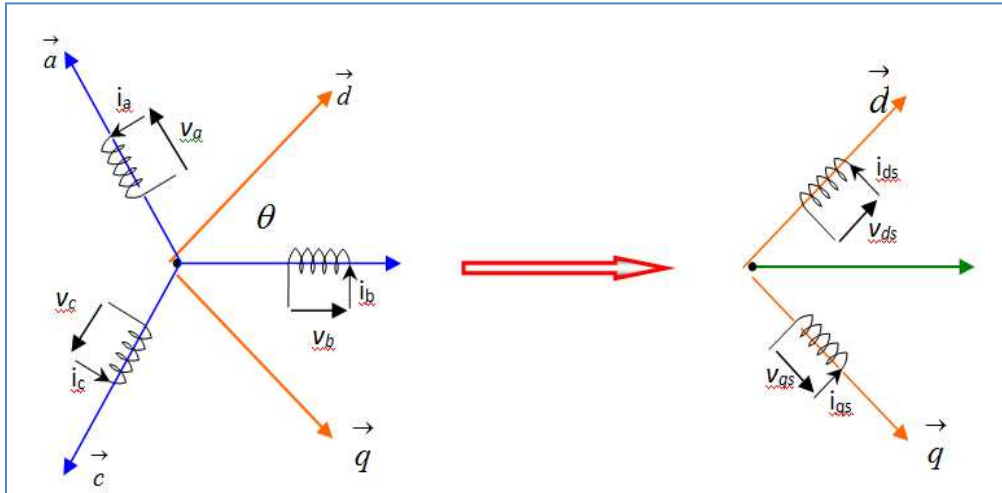


Figure II.14 : Passage de repère triphasé (abc) au diphasé (dq).

La transformation de Park est donnée par :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a,b,c) on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$p(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :

$$[i_{dq}] = p(\theta)[i_{abc}] \quad (\text{II-17})$$

$$[U_{dq}] = p(\theta)[U_{abc}] \quad (\text{II-18})$$

$$[\theta_c] = p(\theta)[\varphi_{abc}] \quad (\text{II-19})$$

L'indice « c » désigne la composante homopolaire, direct et quadrature.

Enfin, les équations de la machine synchrone dans le repère de Park sont données par les expressions suivantes :

$$U_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_d \cdot i_d \quad (\text{II-20})$$

$$U_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_q \cdot i_q \quad (\text{II-21})$$

#### II.4.2 Calcul de puissance

La puissance instantanée  $P(t)$  qui s'écrit pour le stator dans le repère (d,q) :

$$P(t) = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q \quad (\text{II-22})$$

Par ailleurs, la puissance électrique absorbée s'exprime par :

$$P(t) = R_s (I_d + I_q) + \left( I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt} \right) + (I_q \phi_d - I_d \phi_q) \omega \quad (\text{II-23})$$

- Le premier terme représente les pertes joules dans l'induit.
- Le deuxième terme représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine.

#### II.4.3 Expression du couple électromagnétique [28]

$$C_{em} = (k_t \cdot i_q + p(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \quad (\text{II-24})$$

$$k_t = p\phi_f \quad (\text{II-25})$$

Où  $k_t$  prends les valeurs 1 ou 1.5, en fonction de la façon dont est réalisée la transformation de Park (pour notre cas,  $k=1.5$ ).

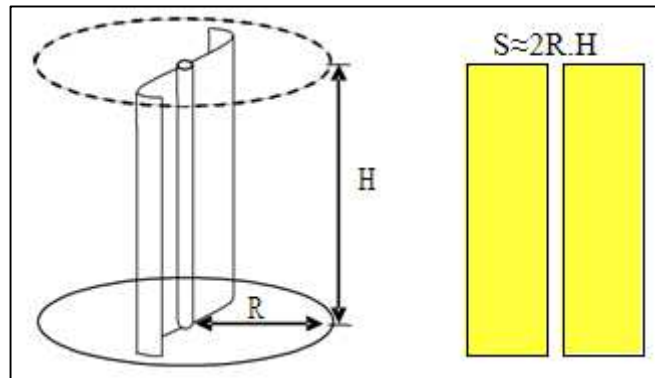
#### II.5 Modélisation de la turbine éolienne

Une turbine éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Pour débiter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse "V" à un moment donné et traverse une certaine surface "A", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (\text{II-26})$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air, qui vaut approximativement 1.2 kg/m<sup>3</sup>. A est la surface balayée par la turbine en m<sup>2</sup>, V est la vitesse du vent en m/s. Cp (coefficient de puissance).

La turbine, utilisée dans le cadre de notre travail, est une éolienne "Savonius" à axe vertical (voire la Figure (II-15)).



**Figure II.15 : Voilure à axe vertical de type Savonius [34]**

La surface "A " donnée par la formule suivant :

$$A = 2R. H \quad (\text{II-27})$$

Où R représente le rayon de la voilure (m) et H sa hauteur (m).

La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante que nous normaliserons en pu:

$$P_m = C_p(\lambda). \rho. H. V^3 \quad (\text{II-28})$$

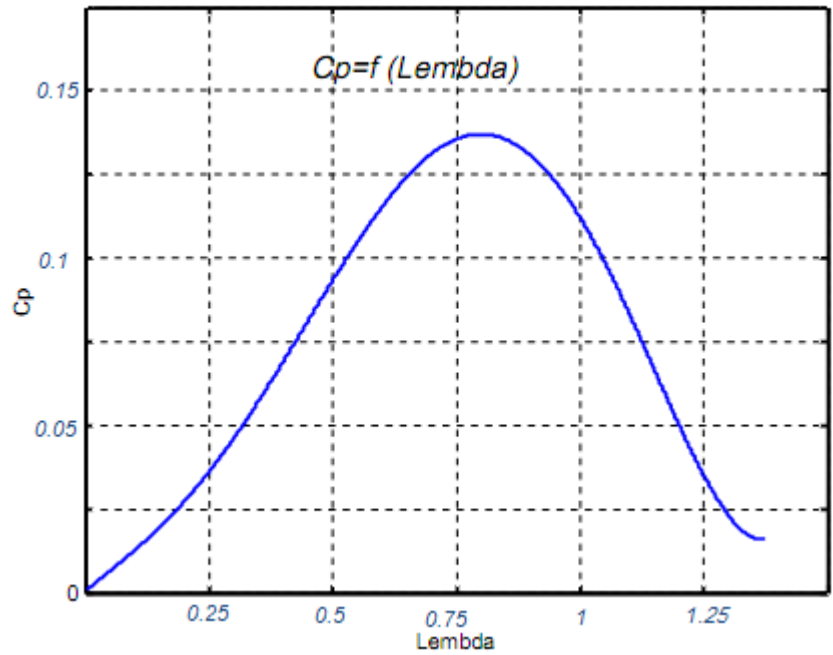
où  $C_p$  est un coefficient qui exprime l'efficacité de la voilure dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est en fait souvent donné en fonction de la vitesse réduite (la vitesse spécifique  $\lambda$ ) qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout des pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit définie par :

$$\lambda = \frac{R. \Omega_1}{V} \quad (\text{II-29})$$

Où  $\Omega_1$  la vitesse angulaire de rotation des pales en rad/s.

L'évaluation du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relèves réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour cette turbine [34], par l'équation analytique en fonction de  $\lambda$  (résultante de l'interpolation) suivant :

$$C_p(\lambda) = -0.12992 \lambda^3 - 0.11681 \lambda^2 + 0.45406 \lambda \quad (\text{II-30})$$

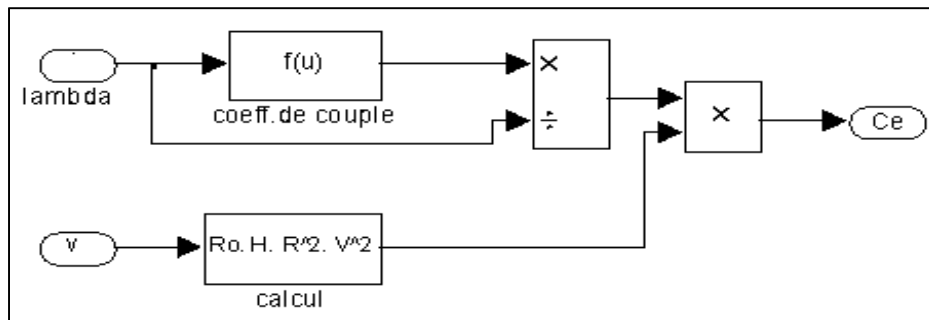


**Figure II.16 : Courbe caractéristique retenue pour les essais.**

La figure (II-16) représente les caractéristiques de coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$ , il présente un facteur de puissance maximal  $C_{p \max} = 0.13$  pour  $\lambda_{\max} = 0.85$ .

Le couple éolien noté :  $C_e$  en utilisant l'expression (II-31) de la vitesse réduite :

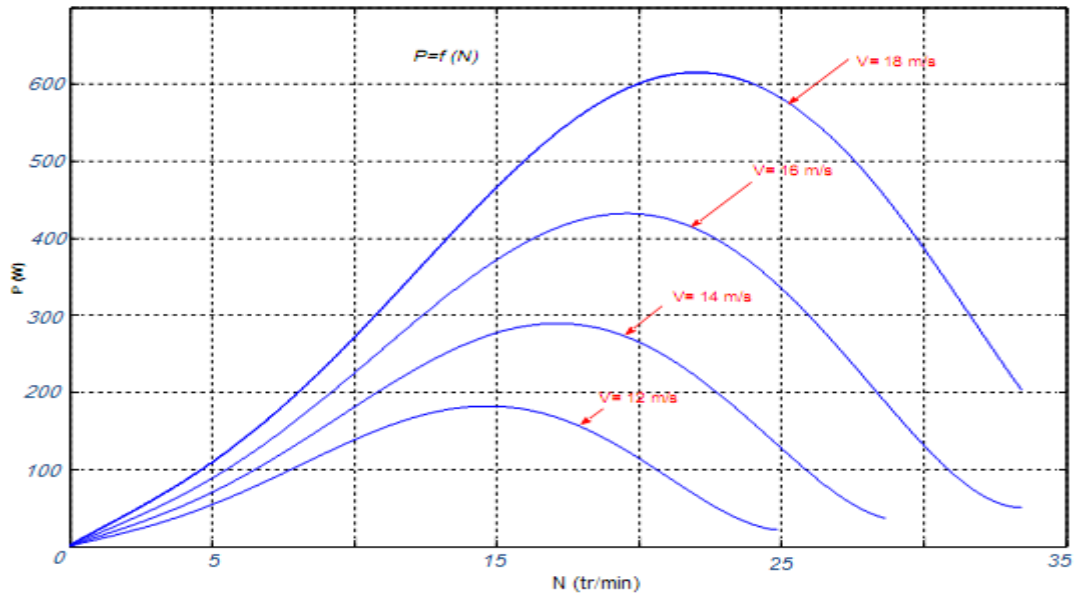
$$C_e = \frac{P_m}{\Omega_1} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V^2}{\lambda} \quad (\text{II-31})$$



**Figure II.17 : Modèle du couple éolien sous Simulink.**

La figure (II-18) présente la caractéristique de la turbine à travers de la courbe d'extraction de puissance éolien de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.





**Figure II.18 : La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation**

On remarque de la figure (II-16) que la puissance électrique est variable avec la variation de la angulaire mécanique de la turbine. L'allure de la puissance électrique en fonction de la angulaire mécanique est semblée à celle du  $C_p$  en fonction de  $\lambda$ . On remarque aussi que plus la vitesse du vent est grande plus la puissance délivrée est grande car la puissance est exprimée par la vitesse cube du vent.

## II.6 Modélisation du couplage turbine – génératrice

Le comportement dynamique (mécanique) de l'ensemble turbine et génératrice peut être représenté par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_{em} - C_f \quad (\text{II-32})$$

où  $\Omega$  la vitesse sur l'arbre du générateur,  $C_f$  le couple de frottement,  $C_{em}$  le couple électromagnétique développé par le générateur,  $C_e$  le couple mécanique appliqué à l'arbre de l'alternateur et  $J$  est le moment total d'inertie, calculé avec :

$$J = J_{gen} + \frac{J_t}{i^2} \quad (\text{II-33})$$

On note que :

$$C_f = f_m \cdot \Omega \quad (\text{II-34})$$

Où  $f_m$  est le coefficient de frottement visqueux en N.m.

Le couple éolien fourni par la turbine, permet d'entraîner la génératrice. En tenant compte des chutes de couple causées par le frottement et l'inertie de la turbine, nous pouvons établir le modèle électromécanique de la figure (II-19), [33].

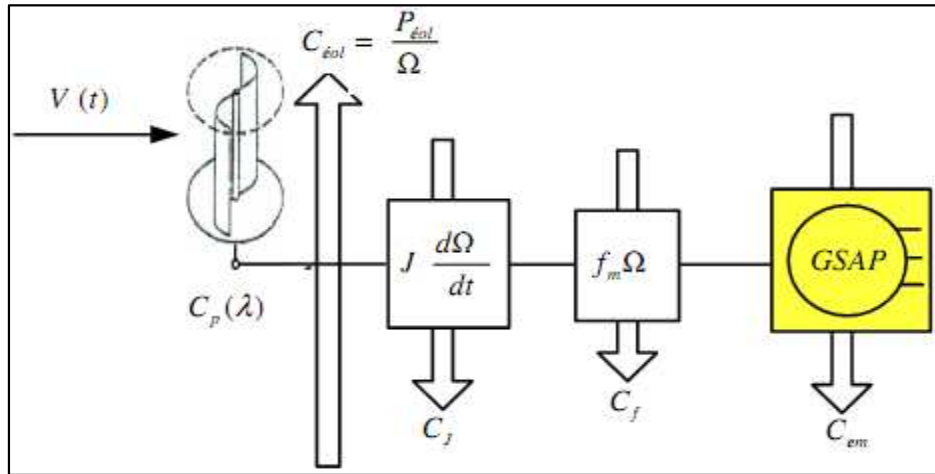


Figure II.19 : Modèle du couple de la turbine éolienne, [33].

On peut aussi, modéliser la turbine par le schéma bloc suivant:

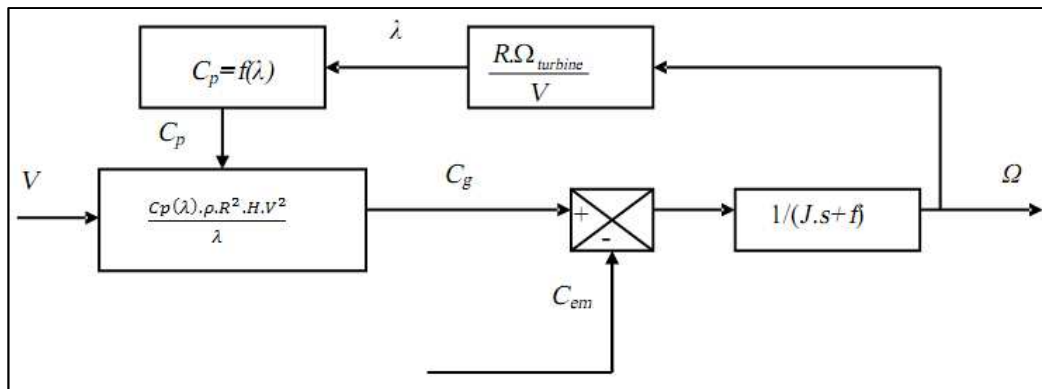


Figure II.20 : Schéma bloc de la turbine éolienne.

### II.7 Modélisation de l'association MSAP – Redresseur à diode :

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (I.21). Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est «naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée, [32].

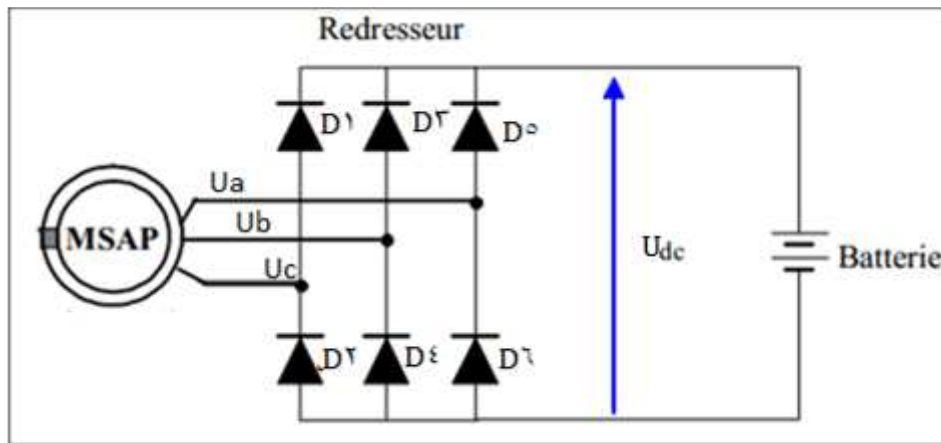


Figure II.21 : Schéma de l'association MSAP – redresseur à diode

$$D_{ab} = 1 \begin{cases} D_1 \text{ est passante} \\ D_4 \text{ est passante} \end{cases} : D_{ba} = 1 \begin{cases} D_3 \text{ est passante} \\ D_2 \text{ est passante} \end{cases}$$

$$D_{ac} = 1 \begin{cases} D_1 \text{ est passante} \\ D_6 \text{ est passante} \end{cases} : D_{ca} = 1 \begin{cases} D_5 \text{ est passante} \\ D_2 \text{ est passante} \end{cases}$$

$$D_{bc} = 1 \begin{cases} D_3 \text{ est passante} \\ D_6 \text{ est passante} \end{cases} : D_{cb} = 1 \begin{cases} D_5 \text{ est passante} \\ D_4 \text{ est passante} \end{cases}$$

La tension du bus continu est donnée alors par :

$U_{dc} = D_{ab}(U_a - U_b) + D_{ba}(U_b - U_a) + D_{ac}(U_a - U_c) + D_{ca}(U_c - U_a) \\ + D_{bc}(U_b - U_c) + D_{cb}(U_c - U_b)$	35
---	----

## II.8 Modélisation du dispositif de stockage

Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, et donc on ne trouve pas de modèle unique qui soit exact dans toutes les circonstances. Notre choix s'est porté sur deux modèles : le modèle dit « CIEMAT » relativement complet, malgré quelques imperfections comme le saut de tension lorsqu'on passe d'un cycle de charge à un cycle de décharge, et le modèle R-C.

- Le modèle R-C : le modèle électrique simple de la batterie comprend une fem  $E_0$  modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie ( $C_b$ ) et une résistance interne ( $R_i$ ), [29]

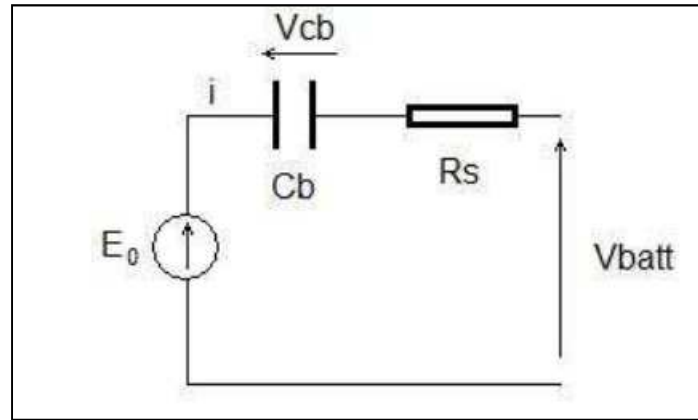


Figure II.22 : Modèle R-C de la batterie

Nous avons donc :

$$U_{\text{batt}} = E_0 - R_i \cdot i - U_{\text{Cb}} \quad (\text{II-36})$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$\text{EDC} = 1 - \frac{Q_d}{C_b} \quad (\text{II-37})$$

Avec  $C_b$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport à  $C_b$ .

Le modèle CIEMAT

Ce modèle est basé sur le schéma suivant (Figure (II-23)) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et sa résistance interne variable, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

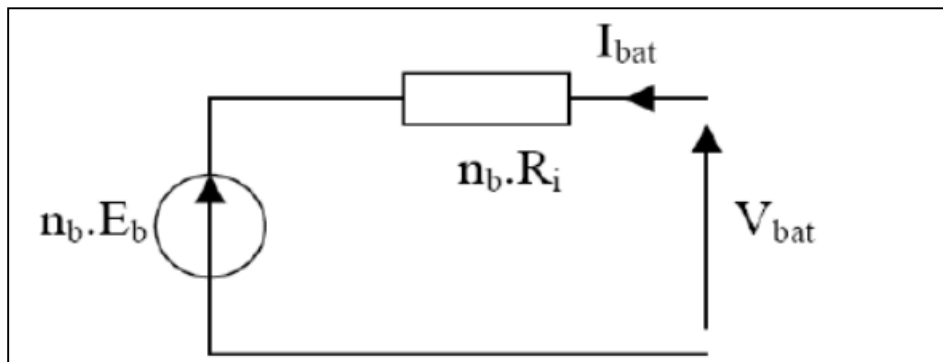
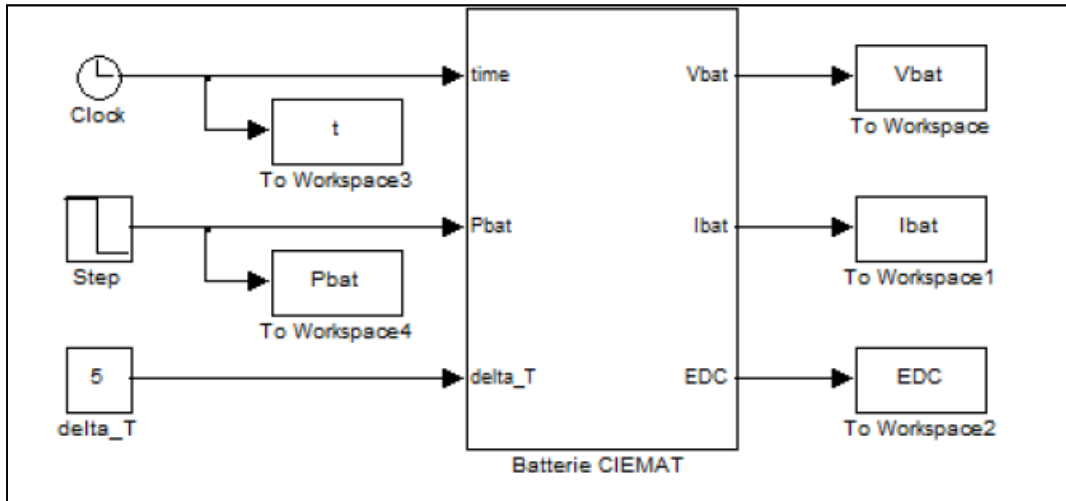


Figure II.23 : Schéma équivalent de  $n_b$  éléments en série.

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène)



**Figure II.24 : Modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Simulink**

Les entrées du modèle de la figure (II-24) sont donc la puissance et l'écart de température par rapport à la température nominale fixée à 25°C. Le calcul de l'état de charge se fait en interne et permet de calculer la tension. La valeur du courant est obtenue à partir de la puissance et de la tension (équation (II-38)). L'horloge représentée sur la figure (II-24) a juste un rôle dans l'acquisition des données.

$$I_{bat} = \frac{P_{bat}}{U_{bat}} \quad (II-38)$$

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous.

L'expression générale de la tension batterie :

$$U_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (II-39)$$

La valeur de la résistance interne de la batterie est calculée en fonction de sa tension nominale

L'expression de l'état de charge :

$$EDC = \frac{Q_d}{C_b} \quad (II-40)$$

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes [29] :

-tension en décharge.

$$U_{bat-dé} = n_b \cdot [1,965 + 0,12 \cdot EDC.] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{(EDC^{1,5})} + 0,02 \right) \cdot (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \quad (II-41)$$

-tension en charge :

$$U_{bat-ch} = n_b \cdot [2 + 0,16 \cdot EDC.] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left( \frac{6}{1 + |I_{bat}|^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - EDC)^{1,2}} + 0,036 \right) \cdot (1 - 0,025 \cdot \Delta T) \quad (II-42)$$

## II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles mathématiques des types du vent et aussi des composantes du système de conversion d'énergie éolienne (modèles de la voilure, de la machine synchrone à aimants permanents et du redresseur). On y montre qu'à l'aide de la transformation de Park, le modèle devient plus simple et les non-linéarités sont réduites au nombre de trois. Les équations obtenues par la transformation de Park engendrent des phénomènes identiques aux phénomènes liés à la machine à courant continu, ce qui confirme l'analogie entre les deux modèles.

Dans la suivant chapitre, nous allons faire la simulation de toute la chaine de conversion d'énergie éolienne. Ces résultats nos permettent on trouve la bon prévision sur la vitesse du vent pour choisie la modèle la plus proche de la vitesse du vent dans la région d'Adrar.

---

*chapitre III*  
*Simulation le Système Globale*

---

### III.1 Introduction:

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

Nous allons faire dans ce chapitre ; la simulation de système éolien avec l'application comme entré les trois modèles de vitesse du vent proposées.

Aussi ; nous présenterons les simulation des composants principales comme la génératrice GSAP à vide et en charge, turbine et charge. Cela à l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle à étudier en schémas bloc.

### III.2 Simulation de système éolienne

La structure de notre système éolien globale avec la charge est donnée par la figure ci-dessus :

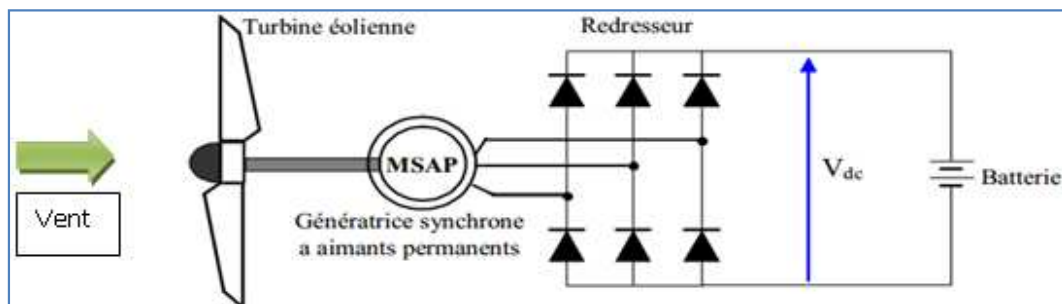


Figure III.1: Structure globale de la chaîne de conversion.

Ce système est composée de le paramètre de entré attaqué un turbine associé un génératrice GSAP avec un redresseur à diode et dispositif de stockage.

#### III.2.1 Simulation des trois modèles du vent

##### III.2.1.1 La 1<sup>ère</sup> modèle du vent :

Le résultat de simulation de La vitesse du vent en fonction de temps. la 1<sup>ère</sup> modèle sont donné par la figure qui suivent:



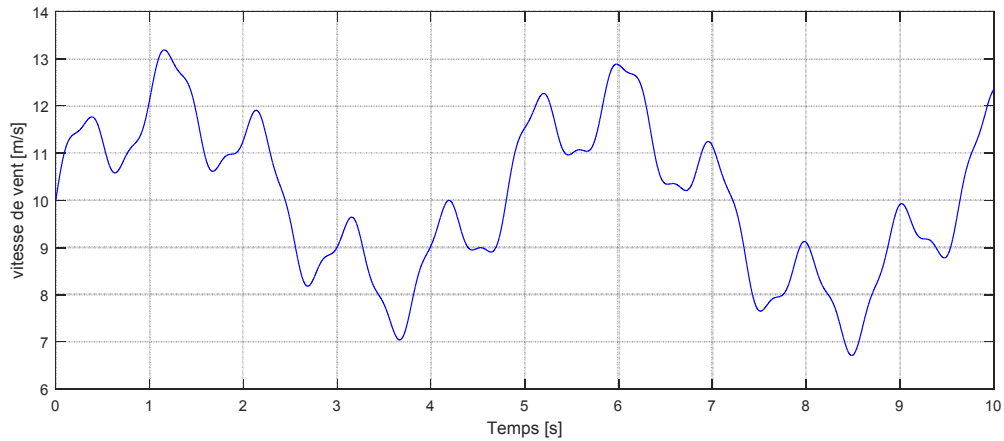


Figure III.2 : La vitesse du vent en fonction de temps.

### III.2.1.2 La 2<sup>eme</sup> modèle :

Leur implémentation Simulink est donnée par la figure suivant :

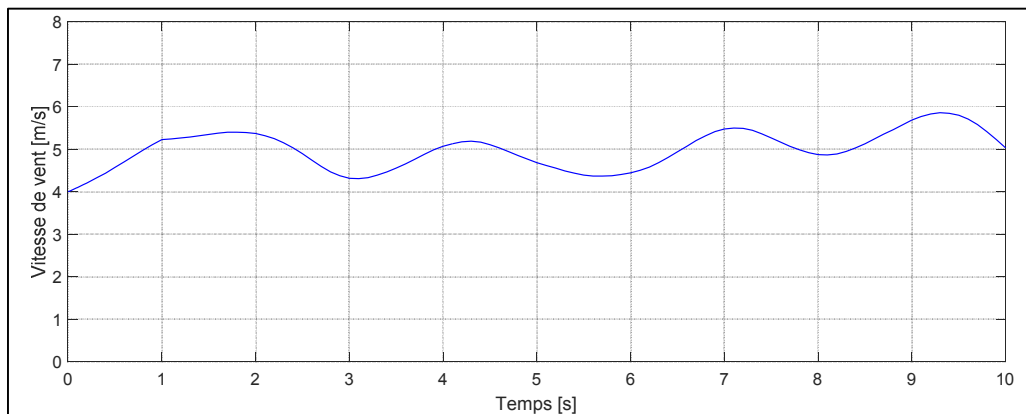


Figure III.3 : Vitesse de vent

La figure (Figure III-3) montre la simulation sur environnement Matlab Simulink avec un temps 10 s.

III.2.1.3 La 3<sup>eme</sup> modèle :

La 3eme modèle ce que nous avons, leur résultat de simulation est donné par la figure qui suit :

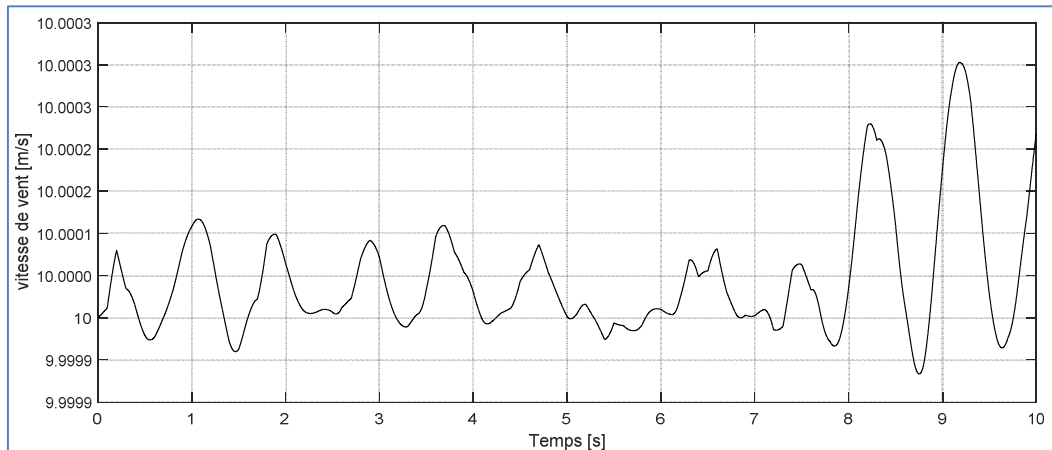
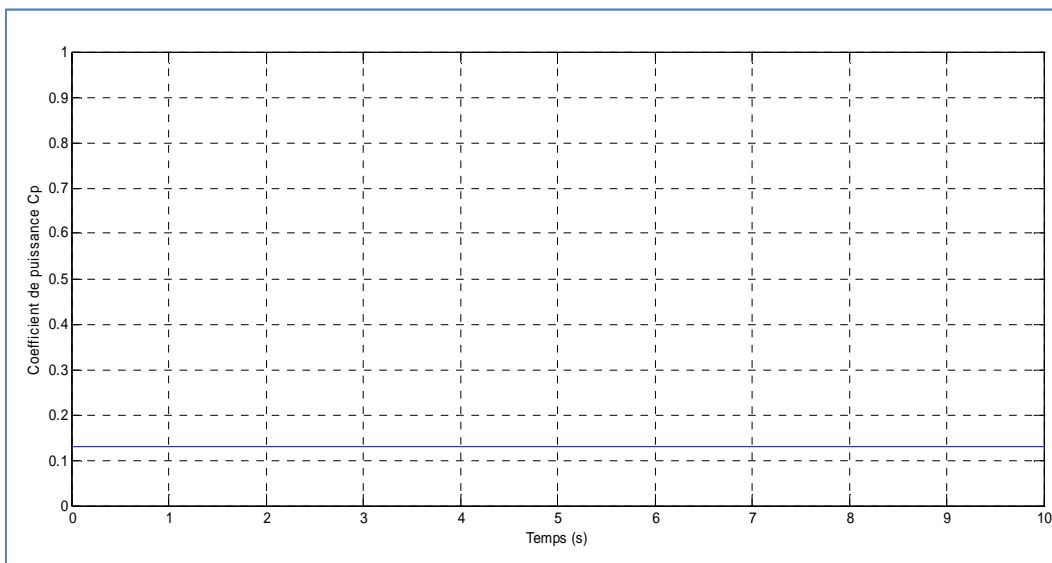
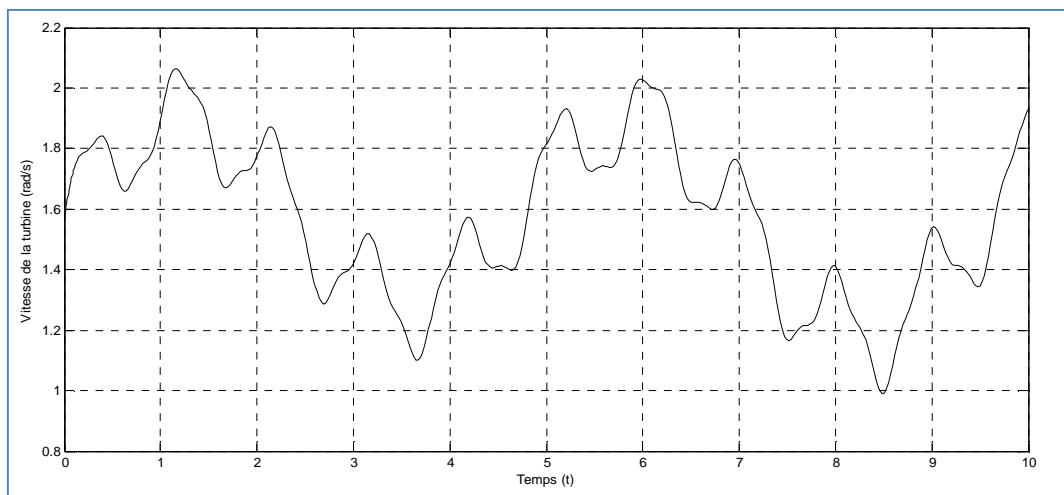


Figure III.4 : vitesse de vent en fonction de temps

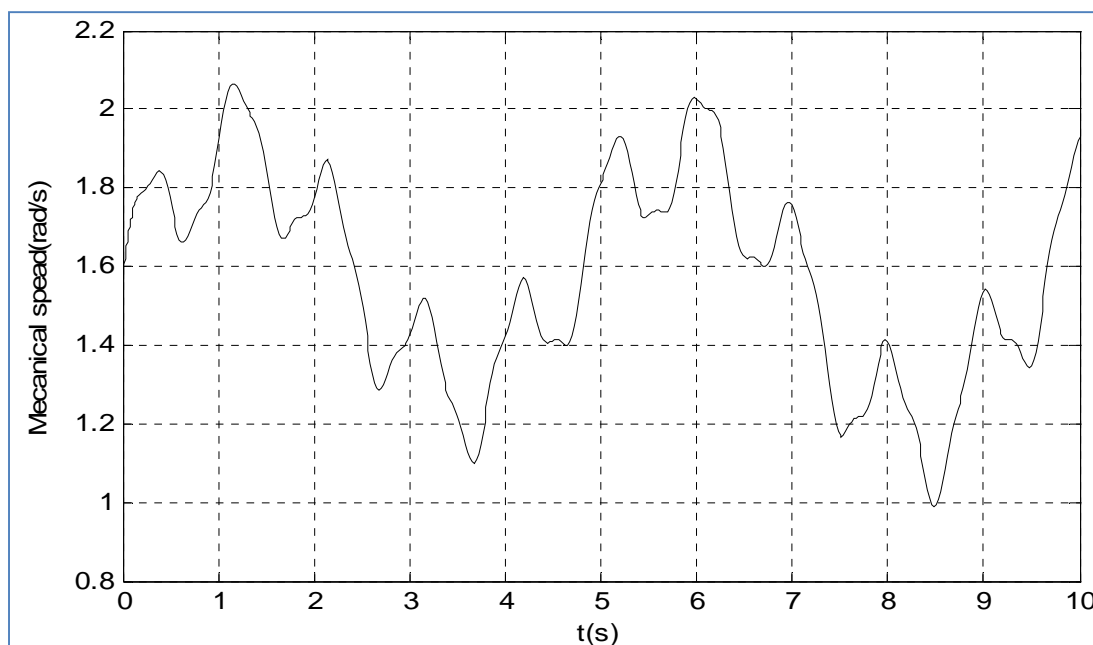
III.2.2 Simulation de la turbine :



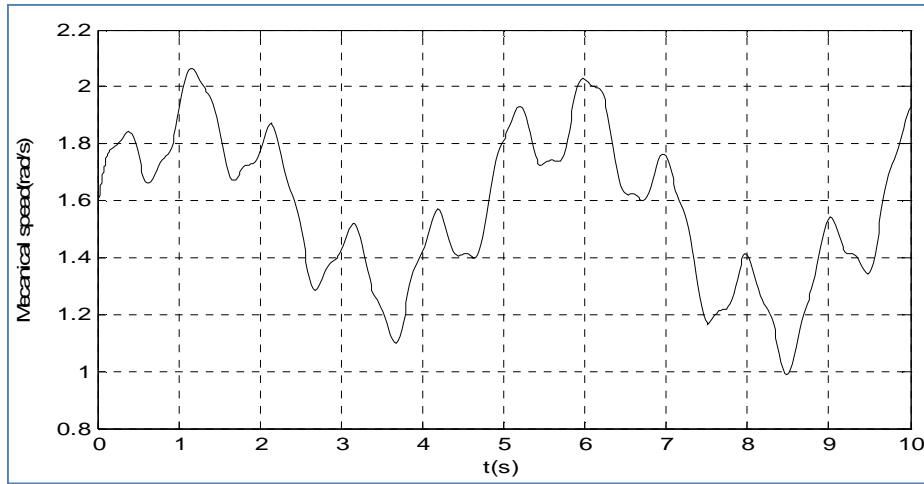
(a) Coefficient de puissance.



(b) La vitesse de la turbine en fonction de temps.



(c) La vitesse électrique de la GSAP en fonction de temps.



(d) La puissance active.

Figure III.5 : les résultats de la simulation de système éolien.

D’après la figure (III.5), la puissance active est de la même forme que celle de la vitesse de rotation de la machine et la vitesse de la turbine.

### III.2.3 Simulation de la génératrice :

Nous obtenons le schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) (Figure (III-6)) :

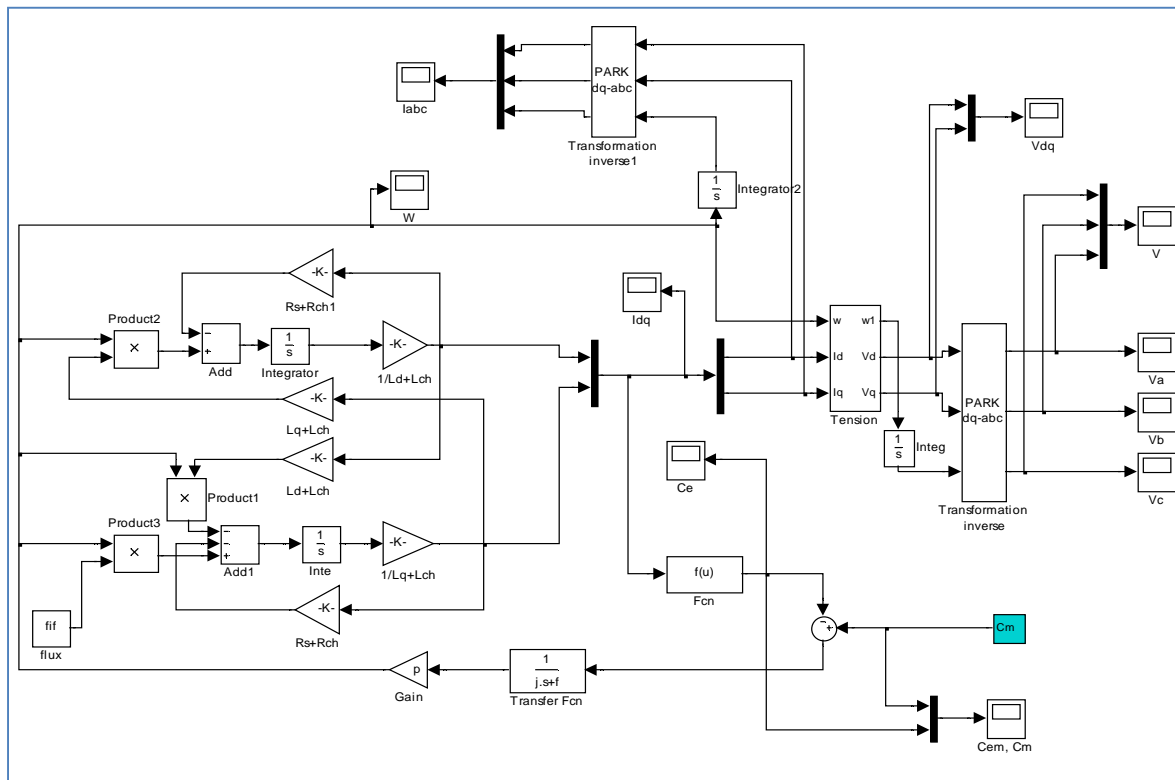


Figure III.6 : Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP)

La figure (Fig. III-6) présente le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) utilisé pour simulation en MATLAB/SIMULINK. Ce modèle sera exploité dans notre système éolien étudié. Les paramètres de la machine utilisée sont notés dans l'annexe.

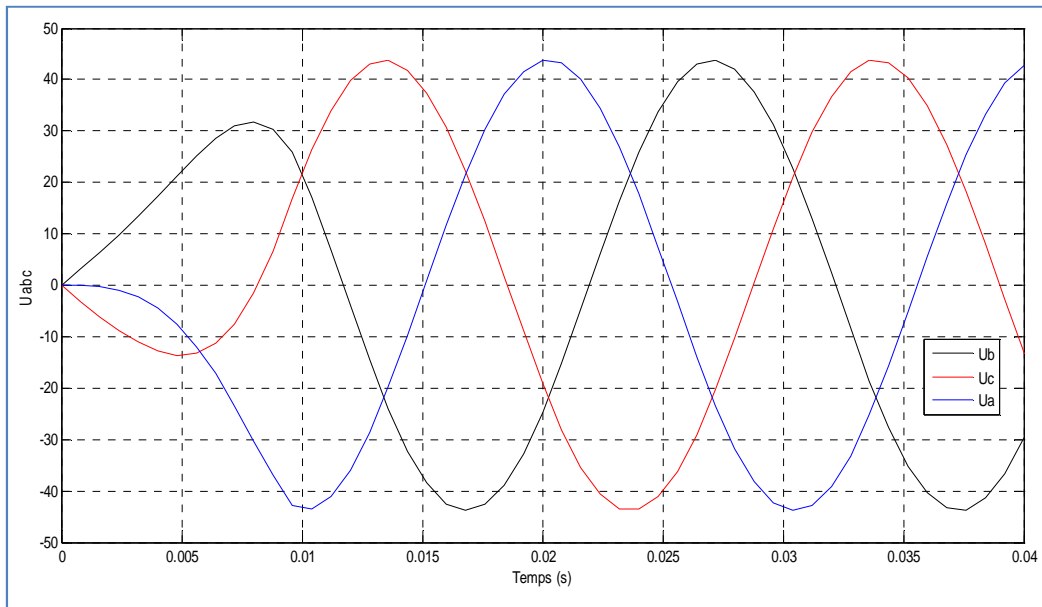
**III.2.3.1 Fonctionnement à vide**

Le fonctionnement à vide est caractérisé par des courants nuls :

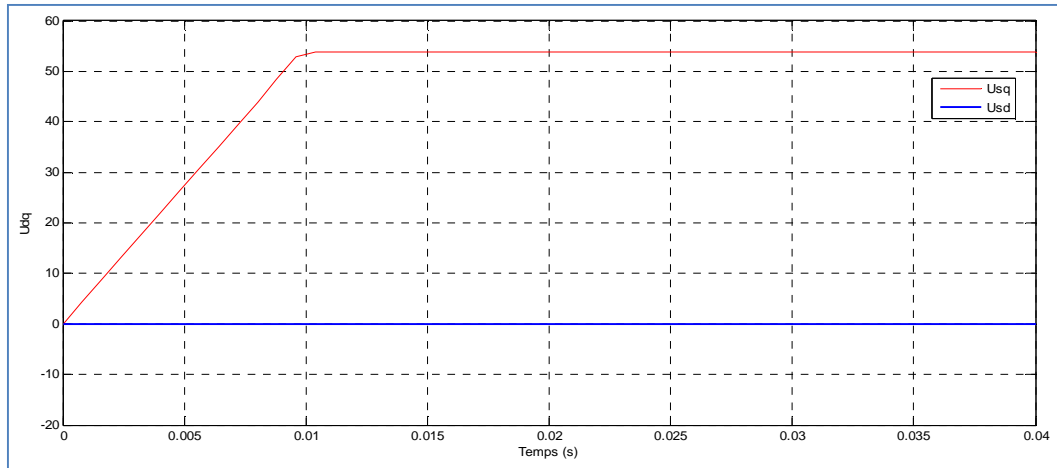
$$\begin{cases} I_{sd} = 0 \\ I_{sq} = 0 \end{cases} \quad \text{(III -1)}$$

Les expressions des tensions et celle du couple deviennent :

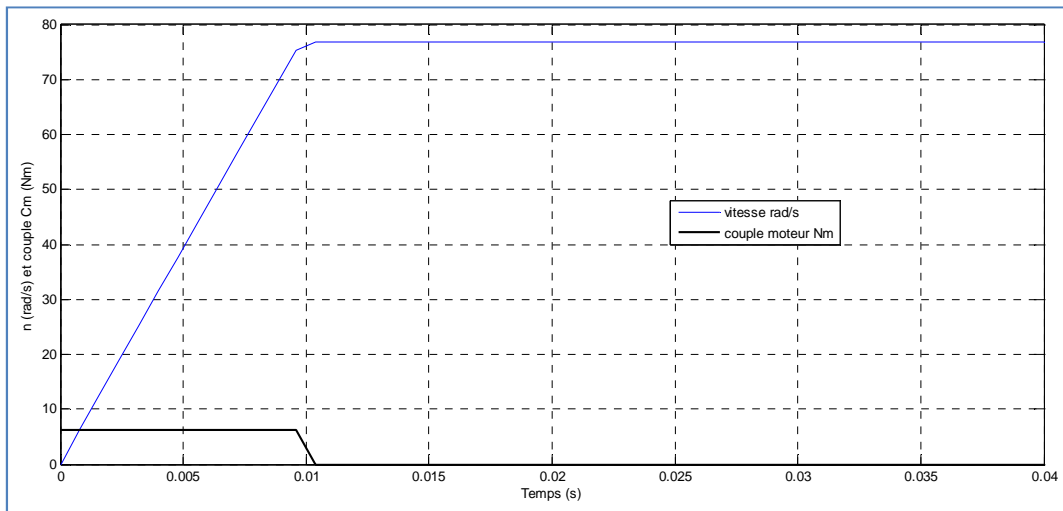
$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = w \cdot \phi_f \\ Cem = 0 \end{cases} \quad \text{(III -2)}$$



(a) Tensions statoriques



(b) Composantes Usd, Usq



(c) Vitesse de rotation et couple moteur.

Figure III.7 : Simulation de la GSAP à vide

### III.2.3.1.1 Interprétation des résultats

On lance la génératrice à l'aide d'un couple moteur égal à 6.28 Nm. Etant donné que les frottements sont considérés nuls, on constate d'après la figure (III-7.c) qu'à la vitesse de 78.5 rad/s, les tensions de phases sont parfaitement sinusoïdales avec une valeur crête de 55V et une fréquence de 50Hz.

### III.2.3.2 Fonctionnement en charge (R<sub>ch</sub>, L<sub>ch</sub>)

La génératrice alimente une charge électrique (R<sub>ch</sub>, L<sub>ch</sub>). Pour obtenir les tensions et les courants résultant de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique les expressions des tensions données par :

$$U_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_d \cdot i_d \tag{III -3}$$

$$U_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_q \cdot i_q$$

D'autre part, l'application des tensions  $U_d$  et  $U_q$  sur la charge donne :

$$U_q = R_{ch} \cdot i_q + L_{ch} \cdot \frac{di_q}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_{ch} \cdot i_d \tag{III -4}$$

$$U_d = R_{ch} \cdot i_d + L_{ch} \cdot \frac{di_d}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_{ch} \cdot i_q$$

En remplaçant les expressions de  $U_d$  et  $U_q$  dans (II-4), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q \omega \cdot I_q \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + L_d \omega \cdot I_d + \phi_f \omega \end{cases} \tag{III-5}$$

On peut construire le bloc de simulation de la génératrice (fig. III- 8).

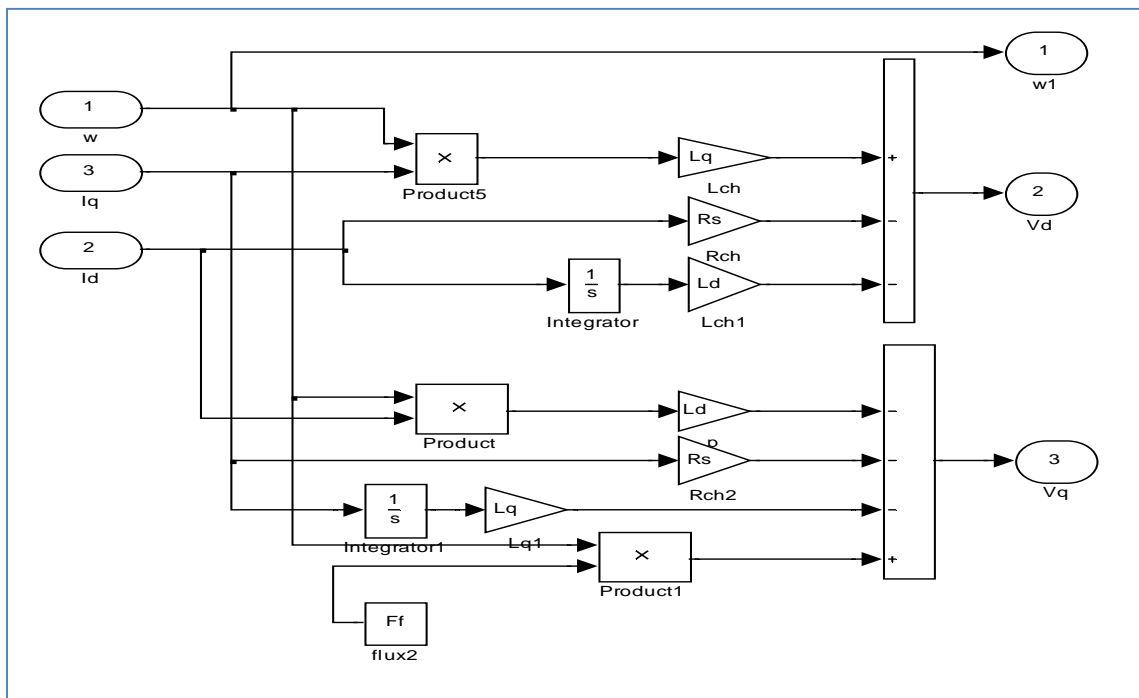
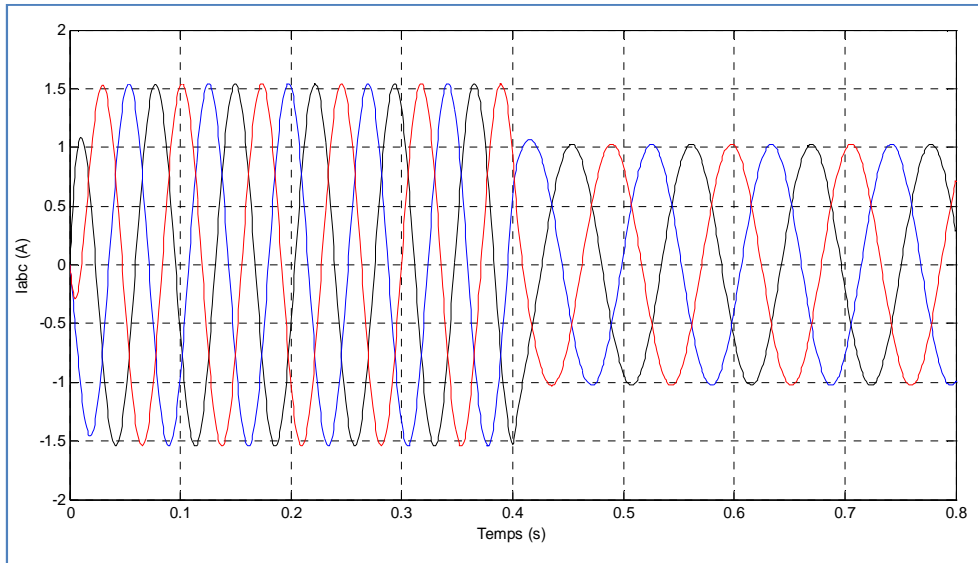
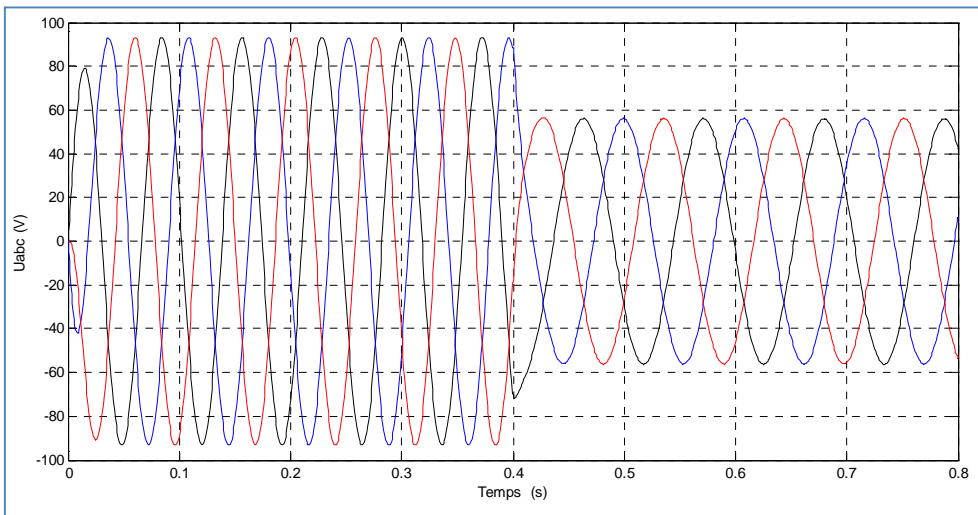


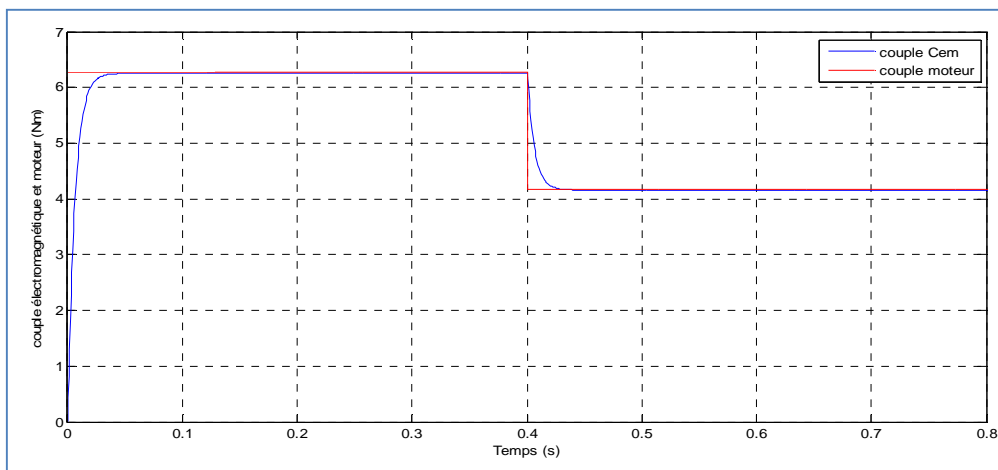
Figure III.8 : Bloc de la simulation de la GSAP en charge



(a) Courants statoriques  $I_{abc}$

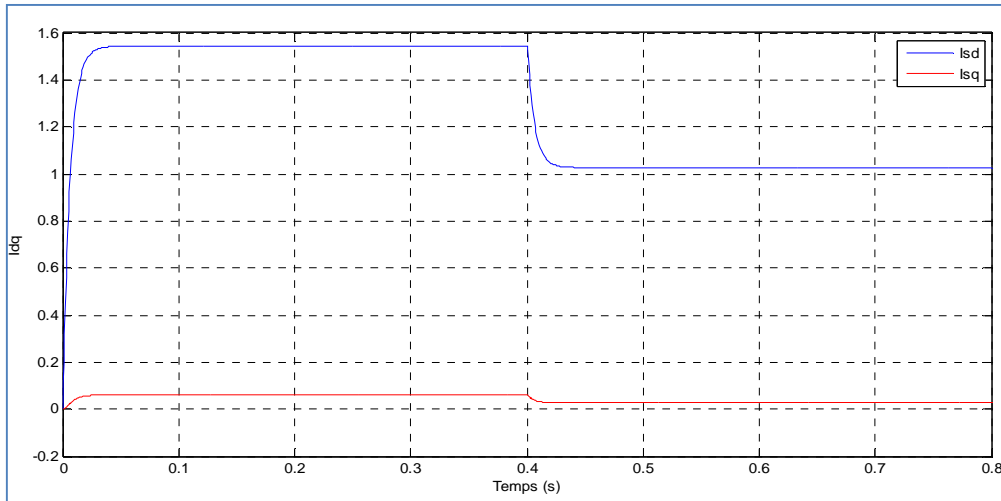


(b) Tensions statoriques  $U_{abc}$

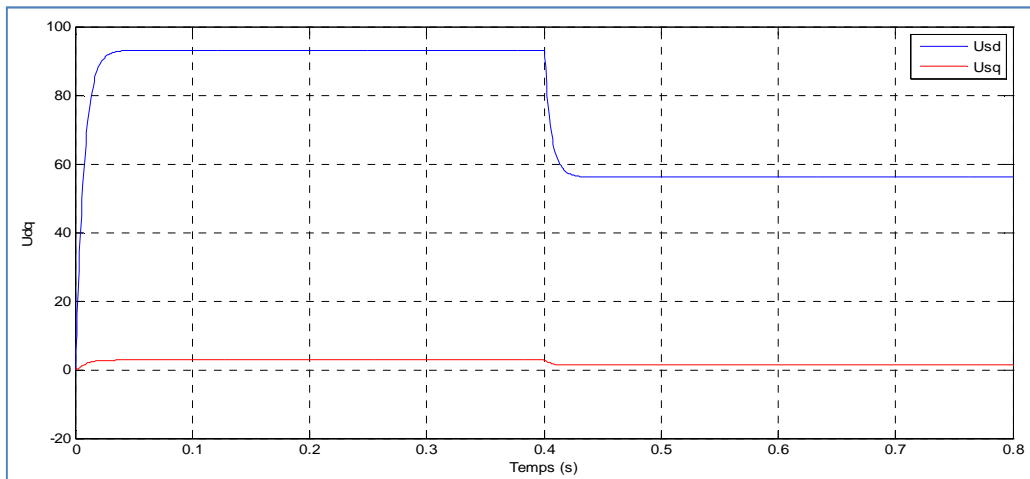


(c) Couples électromagnétique et moteur.

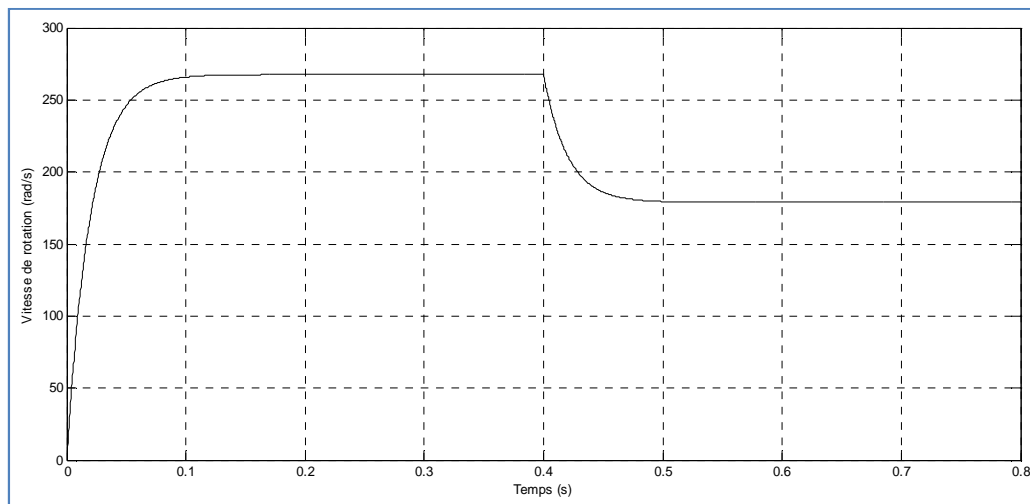




(d) Composants  $I_{sd}$ ;  $I_{sq}$ .



(e) Composants  $U_{sd}$ ;  $U_{sq}$ .



(f) Vitesse de rotation.

Figure III.9 : Simulation de la GSAP en charge.

### III.2.3.2.1 Interprétation des résultats

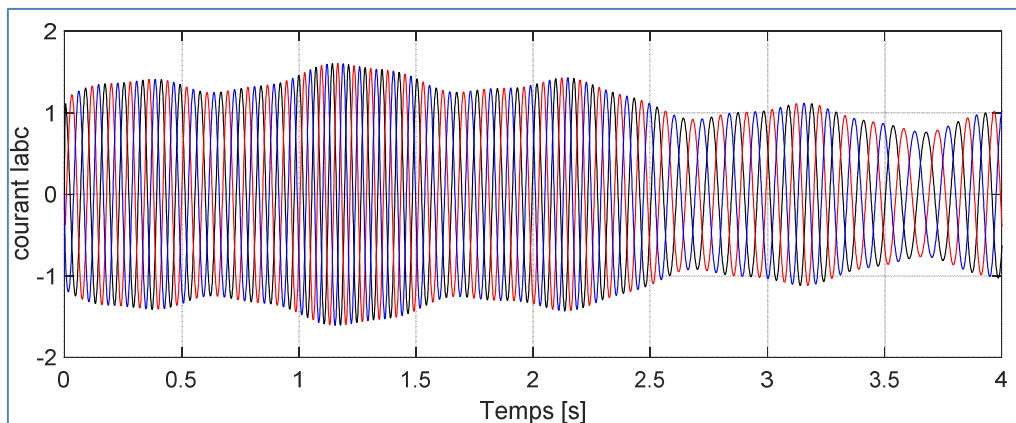
Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (fig. III.9). On constate que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par de faibles tensions et courants représentés sur les figures (fig. III.9.a) et (fig. III.9.b). Cela s'explique par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 6.28Nm, à 4.2Nm, la vitesse mécanique varie de 267.60 rad/s jusqu'à 178.9 rad/s. La tension et le courant diminuent respectivement de 77.17V à 51.6V et de 1.54A à 1.03A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

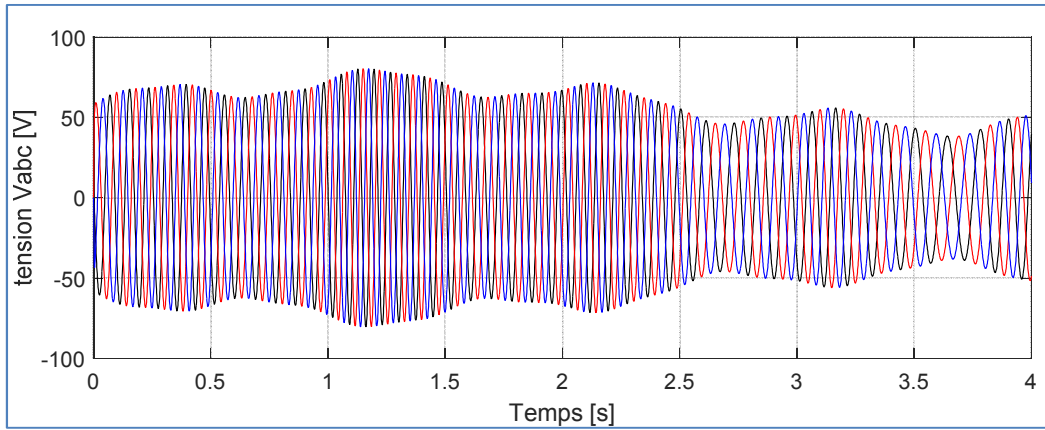
### III.3 Simulation de génératrice GSAP avec les trois modèles de vitesse de vent :

#### III.3.1 1<sup>ère</sup> Modèle

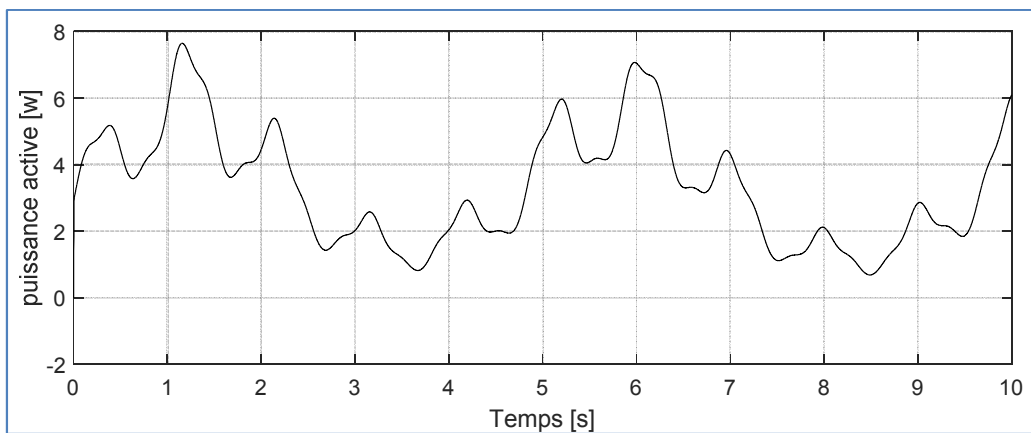
Le vent sera modélisé sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{III} - 13)$$

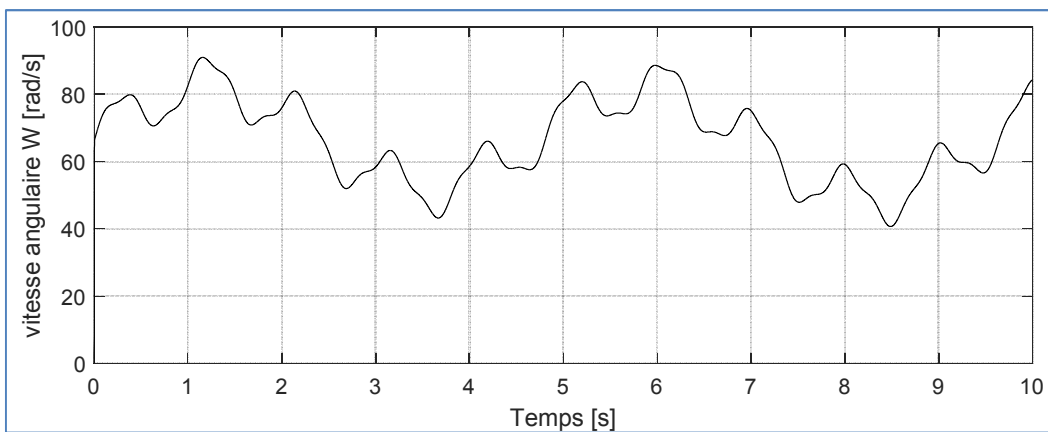
(a) Le courant  $I_{abc}$



(b) : le Tension  $U_{abc}$



(c) La puissance active



(d) Vitesse angulaire  $w$

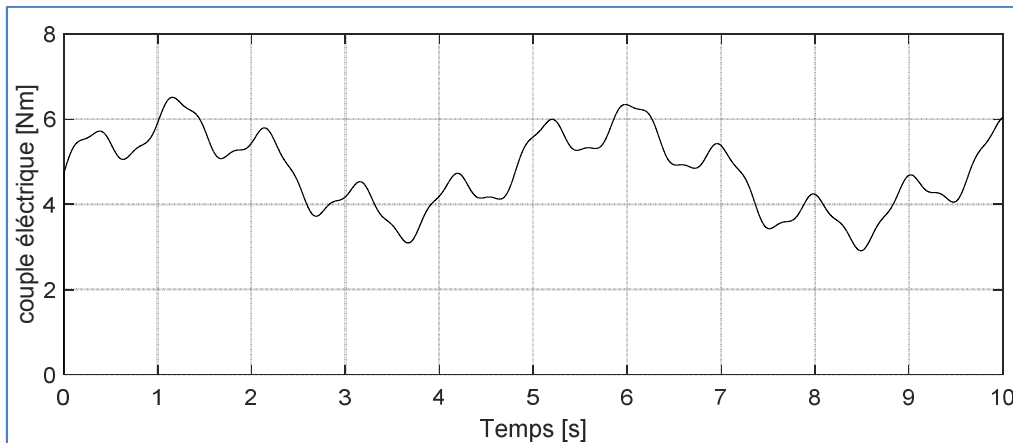
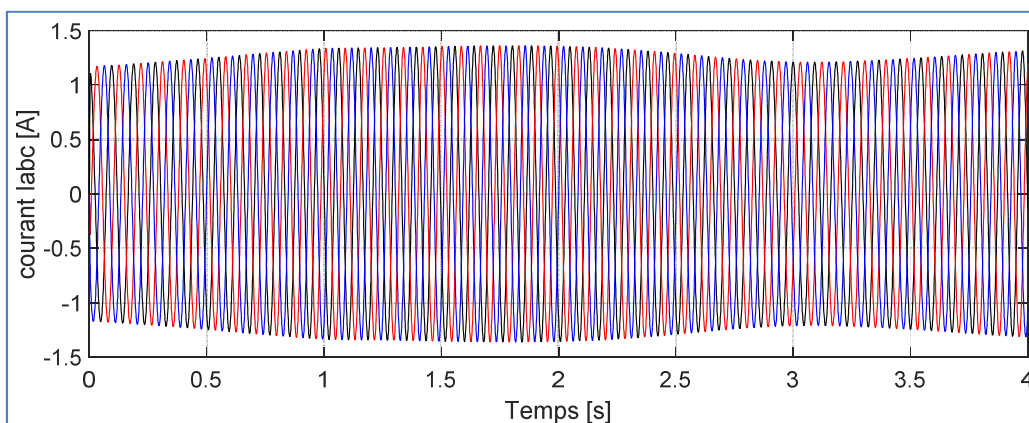
(e) Le couple électrique  $C_e$ 

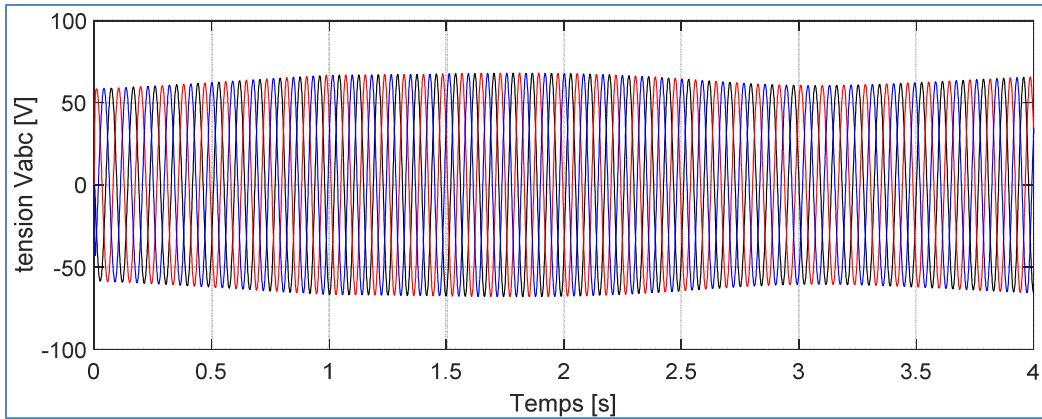
Figure III.10 : résultat de simulation de génératrice GSAP avec le modèle 1 de vitesse de vent

### III.3.1.1 Interprétation

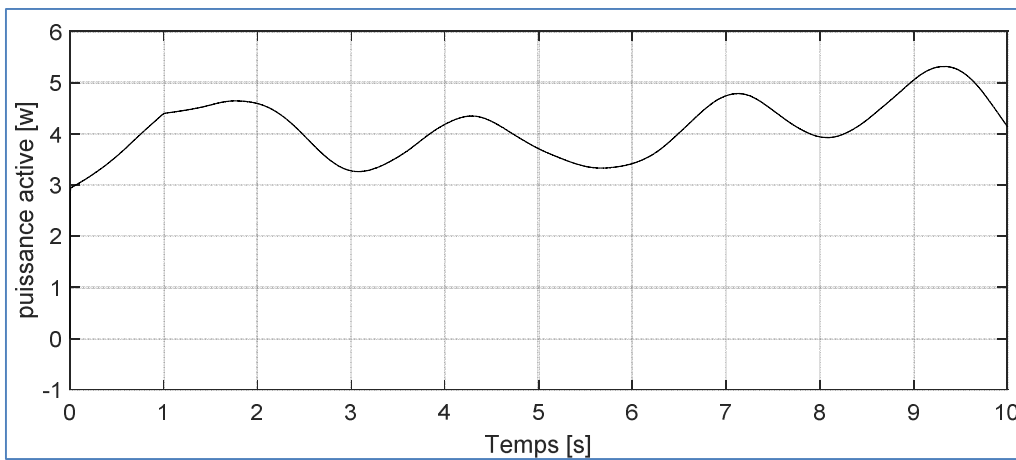
Nous remarquons de cette modèle de vent simulé que les résultats prennent la forme du vent, La puissance active. Mais notre système présent des fluctuations dues à la variation de la vitesse du vent pour cela le système nécessite une commande pour maintenir cette puissance à sa valeur nominale.

### III.3.2 2<sup>eme</sup> Modèle

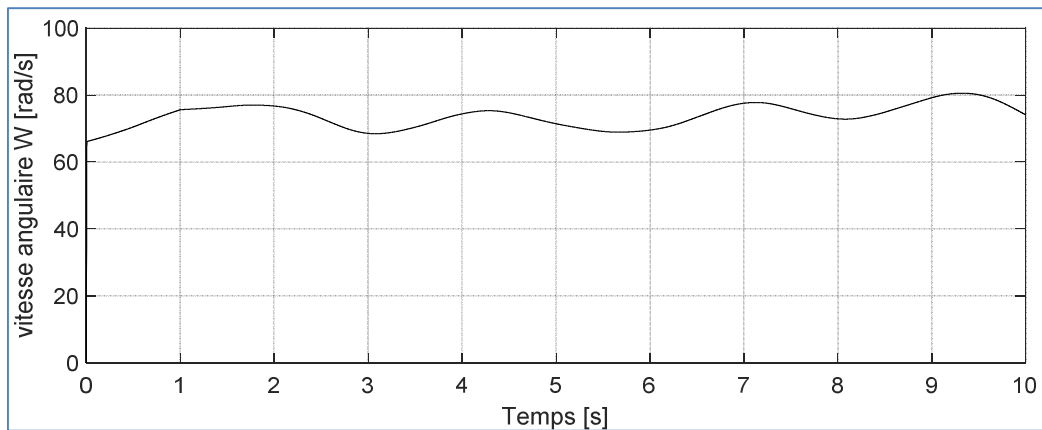
(a) Courant  $I_{abc}$



(b) le Tension  $U_{abc}$



(c) La puissance active



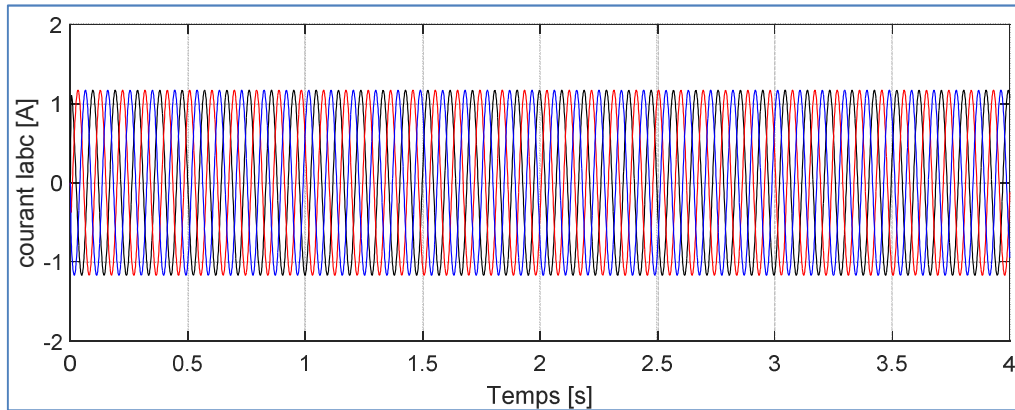
(d) Vitesse angulaire  $w$

Figure III.11 : résultat de simulation de génératrice GSAP avec le modèle 1 de vitesse de vent

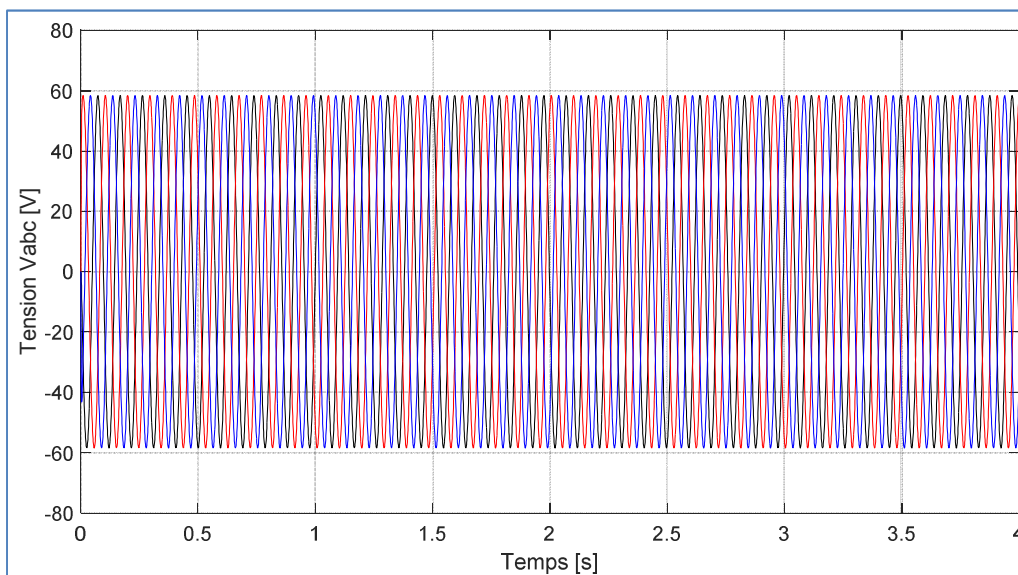
### III.3.2.1 Interprétation

On voit bien que cette modèle de vent simulé c'est comme le modèle passé ; il présente des fluctuations dues à la variation de la vitesse du vent.

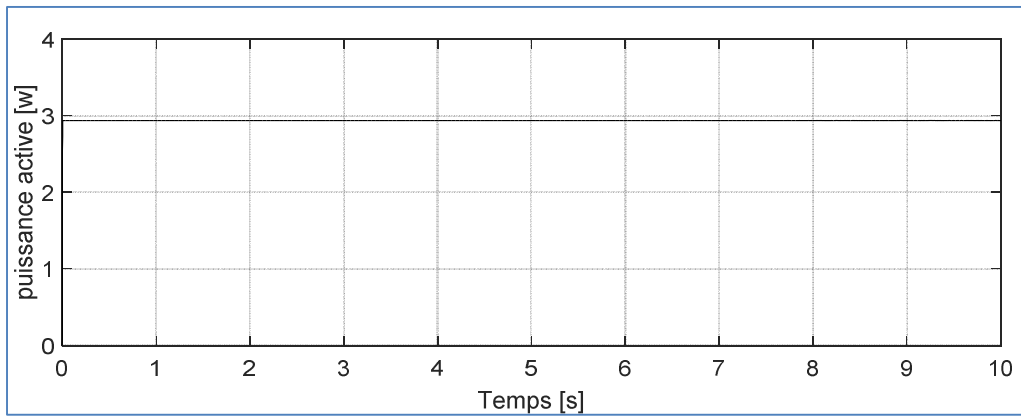
### III.3.3 3<sup>ème</sup> Modèle



(a) Le courant  $I_{abc}$



(b) : le Tension  $U_{abc}$



(c) La puissance active

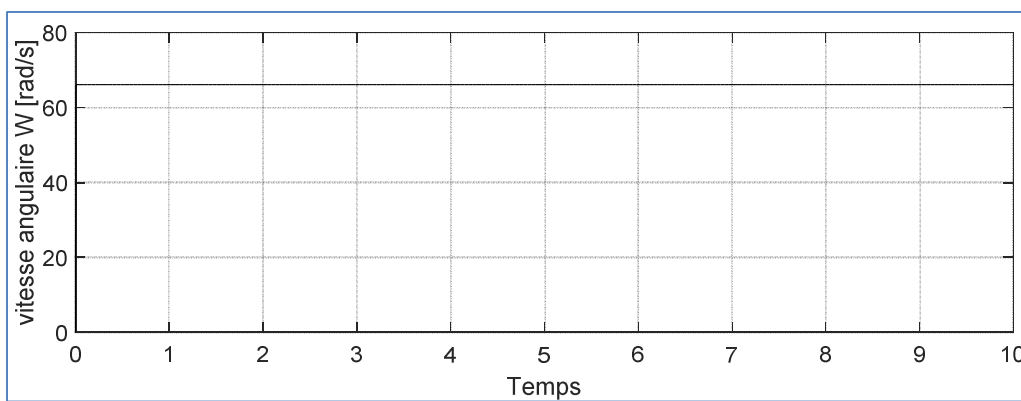
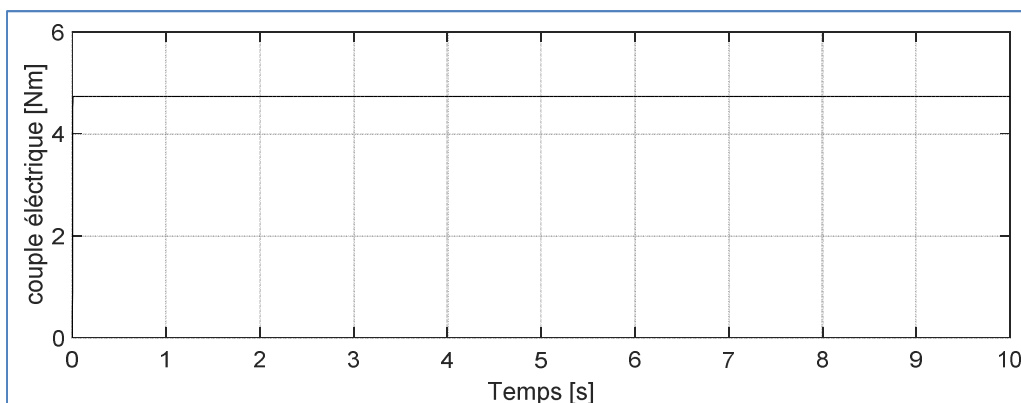
(d) Vitesse angulaire  $w$ (e) Le couple électrique  $C_e$ 

Figure III.12 : résultat de simulation de génératrice GSAP avec le modèle 1 de vitesse de vent

### III.3.3.1 Interprétation des résultats

Nous constatons d'après les simulations effectuées que le modèle trois présente la bonne performance et stabilité de notre système éolien étudié. La tension et courant sont avec forme

sinusoïdale et les autres paramètres sont très stable malgré la fluctuation. Une composante principale du ce modèle est le générateur de bruit blanc normalement distribué. Par conséquent, nous avons obtenir les mêmes séries de temps de vent dans tous les outils de simulation utilisés dans la simulation. Nous remarquons que le générateur de bruit blanc intégré à partir de différents outils de simulation utilisait un algorithme différent et donc une série temporelle différente de vent est obtenue.

#### **III.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les simulations des différents composants de système éolien avec le générateur synchrone à aimants permanents. Nous avons aussi mis ce modèle sous forme de schéma-bloc simple pour pouvoir l'intégrer dans le logiciel SIMULINK. En fin, nous avons présenté la simulation de la génératrice GSAP à vide et en charge pour voir le fonctionnement et la robustes de la machine.

A la fin, nous avons montré la simulation de système avec les modèles proposé pour notre étude ou nous avons trouvé un modèle adaptative développé avec RISO Laboratoire national basé sur les spectres de Kaimal. La vitesse du vent est calculée comme une valeur moyenne de la vitesse du vent à point fixe sur tout le rotor, et il prend en compte le nombre de la tour et les turbulences de rotation.



---

*conclusion générale*

---

### Conclusion Générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème de données réelles de vent et la conception d'un générateur numérique de vitesse de vent chacun entre eux analyse de la production et conversion de l'énergie éolienne. Pour cela, nous avons pris pour objectif de modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne avec plusieurs modèles du vent constituée d'une turbine associée à une génératrice synchrone à aimants permanents. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau ou la charge à alimenter. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de choix le modèle très proche à réal nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

Le premier chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme : la méthode de description du gisement éolien. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Une comparaison entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe. Puis la comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Dans le chapitre deux, tout d'abord nous présentons la distribution de Weibull et quelques caractéristiques de vent et alors nous avons modélisé le trois modèle de vitesse du vent qui est la source principale d'énergie. Nous avons ensuite modélisé chacune des principales composantes du système : la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. De sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent, l'alternateur à aimants permanents, redresseur à diode et la batterie d'accumulateurs. La procédure d'analyse élaborée permet de visualiser le couplage entre un rotor donné et un alternateur donné et de calculer la courbe de puissance d'éolienne qui résulte de l'interaction de ces deux composantes.

Dans le troisième chapitre a été donné quelques résultats de la simulation. Ensuite, nous comparons les résultats entre la simulation de la vitesse du vent et le résultat réel de la région d'Adrar, pour faciliter d'autres études de recherche et de trouver le modèle le plus proche de notre région.

---

# *Annexes*

---

**Annexe A :**

Les pales d'une éolienne tire l'écoulement d'énergie à partir de l'air mobile, qui convertit cette dernière en énergie de rotation et la fournit par l'intermédiaire d'une unité mécanique d'entraînement au rotor d'un générateur électrique. L'énergie cinétique en air d'un objet de la masse  $m$  se déplaçant avec la vitesse  $v$  est égale à [19]:

$$E = \frac{1}{2} m V^2 ; (I.1)$$

La puissance de l'air en mouvement, si nous supposons la vitesse constante du vent, est la suivante :

$$P_{mt} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} m V^2$$

Où :  $m$  - le taux de écoulement (débit) de la masse par seconde

Lorsque l'air passe à travers une zone A, telle que la surface balayée par les pales du rotor, la puissance dans l'air peut être estimé par :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ (W)}$$

Où :  $\rho$  - la densité de l'air. Elle varie avec la pression de l'air et la température, dans le travail on prend  $\rho = 1.225 \text{ m /kg}$ .

L'équation ci-dessus estime combien de puissance se trouve dans le vent, mais quelle quantité de cette puissance peut être obtenue à partir du flux d'air avec un convertisseur de puissance? L'énergie mécanique qui est obtenu du convertisseur à partir du flux d'air sera égale à la différence des puissances du flux d'air avant et après le convertisseur [10] :

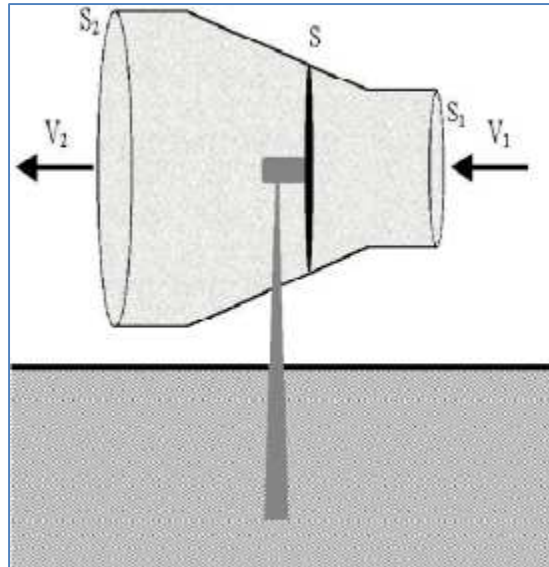


Figure 1 : Tube de courant à travers une éolienne [1]

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho A_1 V_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 V_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 V_1^3 - A_2 V_2^3) ; (W)$$

Où :  $A_1$  et  $A_2$  - les sections transversales avant et après le convertisseur ;

$V_1$  et  $V_2$  - la vitesse du vent avant et après le convertisseur.

Comme le flux d'air passe par le convertisseur, la vitesse du vent doit diminuer derrière le convertisseur de d'énergie éolienne et le flux massif reste invariable. Par conséquent,

$$\rho \cdot V_1 A_1 = \rho \cdot V_2 A_2 ; (Kg/s)$$

Ainsi

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_1 V_1 (V_1^2 - V_2^2) ; (W)$$

De l'équation (1.6), on peut remarquer que la puissance mécanique maximale se produit lorsque  $V_2$  est nulle. Si  $V_2$  est égale à zéro, l'air a été porté à un arrêt complet par le convertisseur, qui n'est pas physiquement possible. Si la vitesse de sortie derrière le convertisseur est zéro, alors la vitesse d'apport doit être zéro, que implique qu'il n'y a pas de débit par le convertisseur. Par conséquent, la puissance mécanique débitée du flux d'air doit être exprimé d'une autre équation. En utilisant la loi de la conservation des impulsions, la force exercée par le vent sur le convertisseur est :

$$F = m \cdot (V_1 - V_2) ; (N)$$

La transmission mécanique extraite est :

$$P_m = F V' = m \cdot (V_1 - V_2) \cdot V' ; (w)$$

En comparant l'équation 1.4 et 1.8 on peut obtenir la relation pour la vitesse du flux  $v'$  :

$$V' = \frac{1}{2} \cdot (V_1 - V_2) ; \text{ m/s}$$

Ainsi la vitesse du flux d'air à travers le convertisseur est égale à la moyenne de  $V_1$  et de  $V_2$ .

La puissance mécanique du convertisseur peut alors être exprimé en tant que:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) ; (\text{W})$$

Si l'on compare cette puissance mécanique de sortie avec la puissance dans le flux d'air qui circule à travers la même surface transversale de la section A, le rapport entre la puissance mécanique débitée par le convertisseur et la puissance contenue dans le flux d'air qui traverse la même zone est appelée le "coefficient de puissance"  $C_p$  et peut être représentée comme suit:

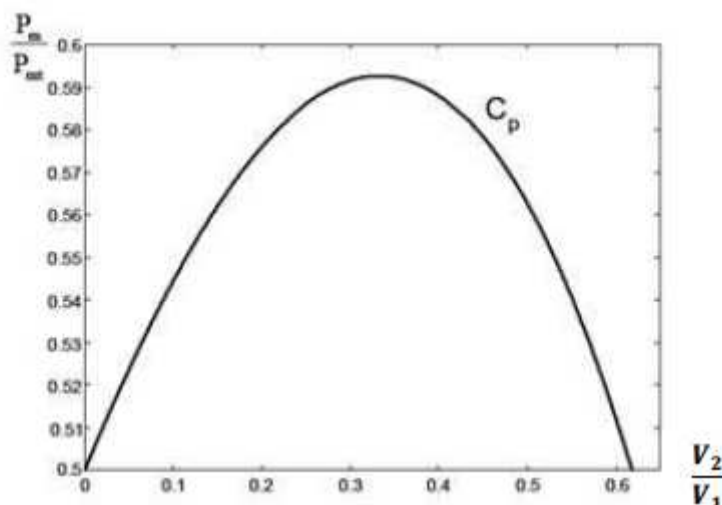
$$c_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2)}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

Le coefficient de puissance peut également être exprimé en termes de rapport de vitesse  $V_1 / V_2$  :

$$c_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \right|$$

Si on trace l'équation (2,12) on remarque que la valeur maximale idéale du coefficient de puissance  $C_p$  donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne se produit quand  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{3}$  (voir la fig. 1.5), donc le  $C_p$  devient :

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593$$



**Courbe caractéristique du coefficient de puissance**

**Annexe B :**

**Les paramètres de la machine utilisée :**