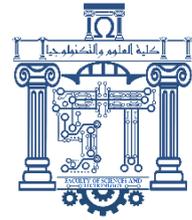




REPUBLIQUE ALGERIENNE
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE LARBI TEBESSI - TEBESSA
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

THEME

**Commande d'un système éolien basé sur une génératrice
synchrone à aimant permanent.**

Présenté par le binôme :

-Kefali Khouala

-Mecheri Wahida

Devant le jury :

Dr. Laatra YUCEFI

Président

Dr. Samir METATLA

Examineur

Pr. Youcef SOUFI

Rapporteur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Louange à Allah le tout puissant qui m'a accordé la foi, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier infiniment mon encadreur, Pr. Youcef SOUFI, pour son aide, sans réserve, sa patience et ses conseils précieux qui m'ont été très utiles.

Nous remercions également les membres du jury qui m'ont honoré en acceptant de juger et d'enrichir ce travail.

Ces remerciements vont aussi à toute ma famille, et tous mes amis pour leur aide et leur soutien.

Je tiens à remercier également tous mes enseignants.

*Kefali Khaoula
Mecheri Wahida*

SOMMAIRE



Sommaire			
	Remerciements		
	Dédicace		
	Notations et abréviations		i
	Liste des figures		iv
	Liste des Tableaux		ix
	Introduction générale		
Chapitre 1			
I	Généralités sur l'énergie renouvelable		
	I.1	Introduction	1
	I.2	Les Energies renouvelables	1
	I.3	Énergies renouvelables, efficacité énergétique, intermittence et stockage	2
	I.4	Les différents types d'énergies renouvelables	2
		I.4.1 Les contraintes techniques	3
		I.4.2 Les contraintes économiques	3
	I.5	Conversion d'Énergie éolienne	4
		I.5.1 Énergie éolienne	4
	I.6	Énergie solaire	6
		I.6.1 Les différentes technologies solaires	6
		I.6.1.1 Solaire à concentration thermodynamique	6
		I.6.1.2 Solaire photovoltaïque	8
	I.7	Energie hydraulique	9
	I.8	Energie géothermie	10
	I.9	Energie de la biomasse	10
	I.10	Énergie de la mer	12

	I.11	Avantages et inconvénients des énergies renouvelables	13
	I.12	Stockage thermique ou pneumatique de l'énergie	13
	I.13	Les énergies renouvelables ont une priorité en Algérie	14
	I.14	Programme des énergies renouvelables	15
	I.15	Conclusion	16
Chapitre 2			
II	Constitution d'une éolienne		
	II.1	Introduction	17
	II.2	L'énergie éolienne	17
	II.3	Systèmes de conversion d'énergie éolienne	19
	II.4	Statistiques et répartition des énergies renouvelables dans le monde	20
	II.5	L'énergie éolienne en Algérie	20
	II.6	Différents types d'éoliennes	22
	II.6.1	Eolienne à axe vertical	22
		II.6.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus	22
		II.6.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius	22
		II.6.1.2.1 Avantages	24
		II.6.2.1.2 Inconvénients	24
	II.6.2	Eoliennes à axe horizontal	24
		II.6.2.1 les éoliennes à rotation lente "multiples"	25
		II.6.2.2 Aérogénérateurs	25
		II.6.2.2.1 Avantages	25
		II.6.2.2.2 Inconvénient	25
	II.7	Constitution d'une éolienne	25
	II.8	Fonctionnement d'une éolienne	27
	II.9	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	28

	II.10	Application éolienne		29
		II.10.1	Systemes isolés	29
		II.10.2	Systemes hybrides	29
		II.10.3	Systemes connectés au réseau	29
	II.11	Les différents systèmes utilisés dans l'exploitation de l'énergie éolienne		29
		II.11.1	Systemes utilisant le générateur synchrone	29
		II.11.2	Systemes utilisant une machine synchrone	30
			II.11.2.1 Machines synchrones à rotor	30
			II.11.2.2 Machines synchrones à aimants permanents	30
	II.12	Conclusion		31
Chapitre 3				
III	Modélisations et simulation d'une génératrice à aimant permanent			
	III.1	Introduction		32
	III.2	Modélisation de la GSAP		32
		III.2.1	Hypothèses simplificatrices	32
		III.2.2	Les équations de tension et flux	33
		III.2.3	Equation mécanique	34
		III.2.4	Transformation de PARK	34
		III.2.5	Passage triphasé au biphasé	35
		III.2.6	Passage biphasé au triphasé	35
	III.3	Modélisation de la MSAP dans le repère de Park		35
		III.3.1	Equations électriques	35
	III.4	Calcul de puissance		36
	III.5	Couple électromagnétique		37
	III.6	Simulation et interprétation des résultats		38
		III.6.1	Fonctionnement à vide	38
	III.7	Fonctionnement en charge (Rch, Lch)		39
	III.8	Conclusion		42
Chapitre 4				
IV	Commande de la GSAP associée avec le système éolien			

IV.1	Introduction	43
IV.2	Principe de la chaîne de conversion éolienne	43
IV.3	Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	44
IV.4	Générateur électrique	45
IV.5	Les convertisseurs utilisés dans le système de conversion éolien	45
IV.6	Les principaux éléments du système de conversion éolienne	47
IV.7	Éoliennes connectées au réseau électrique	48
	IV.7.1 Éoliennes à vitesse fixe	48
	IV.7.2 Éoliennes à vitesse variable	48
IV.8	Modélisation du vent	49
IV.9	Structure générale de la chaîne de conversion	50
	IV.9.1 La puissance aérodynamique	51
	IV.9.2 Schéma bloc du modèle de la turbine	51
	IV.9.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne	52
IV.10	Système de contrôle de l'aérogénérateur	53
IV.11	Régulation de vitesse	53
IV.12	Régulateur de l'angle de calage	54
IV.13	Contrôle de puissance par action mécanique	55
	IV.13.1 Contrôle de puissance par action mécanique	55
	IV.13.2 Contrôle de puissance par action électrique	56
IV.14	Stratégie MPPT avec connaissance de courbe caractéristique	59
	IV.14.1 Commande en vitesse	59
	IV.14.2 Commande en couple	61
IV.15	Générateur éolien	63
IV.16	Simulation et caractéristique de la conversion éolienne étudiée	65
IV.17	Interprétations des résultats de simulations	73
IV.18	Conclusion	73

<i>Notations et Abréviations</i>	
<i>DC-DC</i>	: Hacheur
<i>AC</i>	: Courant alternatif (alternatif current)
<i>DC</i>	: Courant continu (Direct current)
<i>DC-AC</i>	: Onduleur
<i>PMSG</i>	: Générateur synchrone à aimant permanent
<i>SCIG</i>	: Générateur à induction ou à cage d'écureuil
<i>DFIG</i>	: Générateur à induction à double alimentation
<i>WRIG</i>	: Générateur d'induction à rotor bobiné
<i>MSAP</i>	: Machine synchrone à Aimant Permanent
<i>GSAP</i>	: Génératrice Synchrone à Aimant Permanent
<i>MLI</i>	: Modulation de la largeur d'impulsion
<i>MADA</i>	Moteur à double alimentation
<i>GADA</i>	Génératrice à double alimentation
<i>MPPT</i>	: Maximum Power Point Tracking
<i>CSP</i>	L'énergie solaire concentrée
<i>EnR</i>	Energie renouvelables
<i>P</i>	: la force de portance perpendiculaire à V_r
<i>T</i>	: la force de traînée parallèle à la direction V_r de La force de portance P
<i>V</i>	: la vitesse du vent incident sur le rotor
<i>V0</i>	: La vitesse de rotation Ω du rotor

P_n	:	une puissance nominale à un vent nominal
V_n	:	un vent nominal
$RFPM$:	radial flux permanent magnet
$AFPM$:	axial flux permanent magnet
FMM	:	force magnétomotrice
R_s	:	La résistance des phases statoriques
$[U_{sa} \quad U_{sb} \quad U_{sc}]$:	Les tensions des phases statoriques
$[I_{sa} \quad I_{sb} \quad I_{sc}]$:	Les courants des phases statoriques
$[\varphi_{sa} \quad \varphi_{sb} \quad \varphi_{sc}]$:	Les flux totaux à travers les bobines statoriques
φ_f	:	C'est la valeur crête du flux crée par l'aimants permanents à travers les enroulements statorique
$[\varphi_a \quad \varphi_b \quad \varphi_c]$:	Vecteurs des flux dans les enroulements statoriques
C_{em}	:	Couple électromagnétique (couple moteur)
C_m	:	Couple moteur appliqué sur la génératrice (couple résistant)
f	:	Coefficient de frottement
J	:	Moment d'inertie
P	:	Nombre de paires de pôles
$P[\theta]$:	la transformation de Park
$P[\theta]^{-1}$:	La transformation inverse de Park
(d, q)	:	Indice du repère de Park lié au rotor

i_d	:	Courant statorique selon l'axe d
L_d	:	Inductance statorique selon l'axe d
L_q	:	Inductance statorique selon l'axe q
i_q	:	Courant statorique selon l'axe q
ω_r	:	vitesse angulaire en rad/s
S	:	La puissance apparente en VA
P	:	La puissance active en watt (W)
Q		La puissance réactive en (VAR)
E_q		La f.é.m. (la force électromotrice) en (v)
δ		L'angle interne de la machine
θ_q	:	L'angle électrique pour le repère(q)
θ_d	:	L'angle électrique pour le repère (d)
A	:	la valeur moyenne de la vitesse du vent
a_k	:	Amplitude de l'harmonique de l'ordre k
ω_k	:	Pulsation de l'harmonique de l'ordre k
i	:	le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent
j_t et j_m	:	sont les inerties de la turbine et de la machine respectivement
f_m	:	Le coefficient de frottement de la machine
f_t	:	Le coefficient de frottement des pâles

<i>ceol</i>	:	le couple statique fournie par l'éolienne
<i>cem</i>	:	couple électromagnétique
<i>Cp</i> (λ, β)		Coefficient de performance appelé limite de Betz
λ		Rapport de vitesse
β		Angle d'inclinaison
<i>R</i>		Rayon de la turbine (m)
<i>Udc</i>		Tension redressée
<i>idc</i>		Courant du bus continu

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Chapitre 1		
Figure. I.1	: Eoliennes en fonctionnement.....	5
Figure. I.2	: Deux exemples de modules à concentration thermodynamique [5]. Capteurs cylindre- paraboliques, (b) Capteurs paraboliques.....	7
Figure. I.3	: L'énergie solaire thermique.....	8
Figure. I.4	: Les panneaux photovoltaïques.....	8
Figure. I.5	: Barrage sur rivière destiné à la production d'énergie.....	10
Figure. I.6	: Photosynthèse.....	11
Figure. I.7	: Différents types de l'énergie biomasse.....	12
Figure. I.8	: Bulbes de conversion de l'énergie thermique des.....	12
Figure. I.9	: Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh.....	15
Figure. I.10	: Structure du parc de la production nationale en MW.....	16
Chapitre 2		
Figure. II.1	: Carte du gisement éolien en Algérie (CDER.....	18
Figure. II.2	: Principe de conversion de l'énergie éolienne.....	19
Figure. II.3	: Répartition des énergies renouvelables dans le monde.....	20
Figure. II.4	: La vitesse de vent en Algérie.....	21
Figure. II.5	: La vitesse du vent en saison été et printemps.....	21
Figure. II.6	: La vitesse du vent en saison d'hiver et automne.....	22
Figure. II.7	: Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus).....	23
Figure. II.8	: Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).....	23
Figure. II.9	: Eoliennes tripales et multi-pales.....	24
Figure. II.10	: Constitution d'une éolienne.....	27
Figure. II.11	: Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne.....	28
Chapitre 3		
Figure. III.1	: Machine équivalente au sens de Park.....	32
Figure. III.2	: Passage de repère triphasé (abc) au diphasé (dq).....	34
Figure. III.3	: Modèle de PARK pour la GSAP.....	36
Figure. III.4	: Bloc de la simulation de la GSAP.....	38

Figure. III.5	: Tensions statoriques V_{abc} à vide	38
Figure. III.6	: Tensions dq dans le repère de Park.....	39
Figure. III.7	: Tension statoriques V_{abc} en charge.....	40
Figure. III.8	: Courants statoriques I_{abc} en charge.....	41
Figure. III.9	: Courants dans le repère de Park dq.....	41
Chapitre 4		
Figure.IV.1	: Synoptique de la chaîne de conversion éolienne.....	43
Figure. IV.2	: Principe de la conversion d'énergie éolienne.....	44
Figure.IV.3	: Chaîne de conversion éolienne à base de GSAP (1) : Les pales ; (2) : Tour ; (3) : La génératrice.....	45
Figure. IV.4	: Convertisseurs de puissance dans la chaîne de conversion.....	46
Figure. IV.5	: Configuration du système éolien connecté au réseau considéré.....	47
Figure. IV.6	: La vitesse du vent en fonction de temps.....	50
Figure. IV.7	: Structure générale de la chaîne de conversion.....	50
Figure. IV.8	: Schéma bloc du modèle de la turbine.....	51
Figure. IV.9	: Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	52
Figure. IV.10	: Boucle de régulation de la vitesse de rotation.....	54
Figure. IV.11	: Principe du contrôle de l'angle de calage.....	54
Figure. IV.12	: Gestion de l'angle de calage (pleine charge).....	55
Figure. IV.13	: Courbe C_p du modèle de Simulink	57
Figure. VI.14	: Modèle dynamique de l'éolienne	58
Figure. IV.15	: Courbe de puissance d'une éolienne pour différentes vitesses de vent.....	58
Figure. IV.16	: vitesse de référence en fonction de la puissance.....	60
Figure. IV.17	: Convergence vers le point maximum via contrôle de la vitesse.....	61
Figure. IV.18	: Convergence vers le point maximum via contrôle de vent.....	61
Figure. IV.19	: (a).Famille de courbe du couple pour différentes vitesses du vent.....	62
Figure. IV.20	: Caractéristiques de la PMSG considéré.....	63
Figure. IV.21	: Paramètres de la PMSG considéré.....	64
Figure.IV.22	: Structure de simulation et de commande de l'ensemble (Turbine et génératrice)....	65
Figure. IV.23	: Tensions triphasés.....	66
Figure. IV.24	: Zoom de tensions triphasées.....	66
Figure. IV.25	: Courants triphasés.....	67
Figure. IV.26	: Zoom courants triphasés.....	67
Figure. IV.27	: Courant I_{sd} et I_{sq}	68

Figure. IV.28	:	Puissance de la GSAP et Turbine courants.....	68
Figure. IV.29	:	Couple de la turbine.....	69
Figure. IV.30	:	Couple Electromagnétique.....	69
Figure. IV.31	:	Vitesse du vent.....	70
Figure. IV.32	:	Puissance de la GSAP.....	70
Figure. IV.33	:	Zoom signal gâchette redresseur.....	71
Figure. IV.34	:	Zoom signal gâchette onduleur.....	71
Figure. IV.35	:	Vitesse de la GSAP.....	72

INTRODUCTION

INTRODUCTION

GENERALE

GENERALE

Introduction Générale

Les besoins de l'humanité en matière d'énergie électrique mondiale augmentent en 2050 d'environ 30% selon les spécialistes. L'épuisement, l'incertain et l'instabilité des prix des énergies fossiles, la conscience environnementale, la libéralisation du marché électrique et de service sont des préoccupations majeures pour les acteurs mondiaux pour l'intégration et le développement des énergies renouvelables. Ces dernières se développent à un rythme rapide dans le monde pour générer le besoin d'électricité et pour diminuer la pollution. Elles ont atteint une maturité technique qui leur permet de devenir un segment important de l'industrie de l'énergie. Cependant, en raison de leur dépendance aux conditions météorologiques, les sources renouvelables imposent de nouveaux défis au système électrique.

Le système éolien est l'un des plus connus et utilisés source d'énergie renouvelable. Il n'a pas seulement plusieurs avantages environnementaux et économiques, mais aussi, il peut être installé dans toutes les régions ventées. Le système éolien produit de l'énergie électrique de la vitesse du vent après sa conversion en énergie mécanique par le générateur.

D'après la littérature, On trouve plusieurs types de générateurs tels le générateur synchrone à aimant permanent (PMSG), générateur à induction ou à cage d'écureuil générateur (SCIG), générateur à induction à double alimentation (DFIG), et générateur d'induction à rotor bobiné (WRIG). Alors que le générateur PMSG est connu pour sa fiabilité, efficacité, faible coût et petite taille par rapport à SCIG, DFIG et WRIG. De plus, le système éolien installé dans de le monde peut être classé en deux catégories, correspondant à sa taille : la grande éolienne et la petite éolienne.

Au cours des deux dernières décennies, la production de la taille des éoliennes est passée de 20 kW à 5 MW. Il existe actuellement diverses technologies concurrentes pour systèmes éoliens dont les différences résident dans complexité, coût et degré de contrôle du système caractéristiques. Dans le système de conservation de l'énergie éolienne, l'éolienne capte l'énergie éolienne. Puis le générateur le change en puissance électrique. Les turbines éoliennes sont classées en deux types en tant que vent à vitesse fixe et éolienne à vitesse variable. Les éoliennes à vitesse variable produisent plus d'énergie que celle de la vitesse fixe, réduire les fluctuations de puissance et améliorer l'énergie réactive d'alimentation réactive. Principalement, les générateurs synchrones à aimant permanent (PMSG) et les générateurs à induction doublement alimentés (DFIG) sont utilisés à vitesse variable.

Sur ce, de nombreuses études scientifiques se sont concentrées sur la dynamique modélisation et simulation du petit système éolien en afin de décrire son modèle physique dynamique et de prédire l'évolution de ses sorties telles que le courant, la tension et la puissance.

Pour intégrer ces sources dans le système électrique conventionnel, la structure du système électrique doit être modifiée. Le concept des microgrids est considéré comme la solution appropriée pour l'intégration au réseau des sources renouvelables.

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) à vitesse variable. Ce choix est justifié par l'intérêt que portent les chercheurs et les industriels à ce type de structures d'éoliennes. En effet, le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques permet une meilleure utilisation des génératrices synchrones à aimant permanent et à moindre coût pour la construction de grandes machines. La modélisation, simulation et commande d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents connectés aux réseaux. Dans un premier temps, le modèle de chaque élément constituant la chaîne de conversion est proposé. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est par la suite simulé dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du système de conversion d'énergie éolienne considéré qui peuvent être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

Dans cette étude, le modèle du système éolien, qui prend en compte l'aérodynamique et la dynamique électrique d'un générateur en vue de sa commande est abordé. Le logiciel Matlab/Simulink est utilisé pour la simulation du modèle du système considéré. Les simulations de l'éolienne à base d'un générateur synchrone à aimant permanent associée à convertisseurs électroniques de puissance ont été analysés en fonction des performances lors de diverses entrées vitesses du vent. Par conséquent, les résultats de la simulation du le modèle mathématique du système complet est réalisé dans ce mémoire et les résultats de simulation obtenues montrent la validité et l'efficacité du système proposé.

Pour ce faire et pour l'établissement de cette étude, outre une introduction générale et une conclusion générale, le contenu de cette thèse est réparti en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré et décrit d'une manière générale les différents systèmes d'énergies renouvelables destinés à la production de l'énergie électrique, leurs technologies,

architectures et leur principe de fonctionnement tout en donnant les avantages et les inconvénients de chaque.

Le deuxième chapitre est réservé à la constitution et la description en générale des différents types d'éoliennes tout en donnant leurs différents composants à la première partie de ce chapitre et la deuxième partie est consacré aux différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne en utilisant les générateurs synchrones et asynchrones.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation et à la simulation du générateur synchrone à aimant permanent considéré, qui est une étape primordiale pour l'étude du système, en présentant son modèle mathématique en vue de sa commande dans la chaîne de production d'énergie électrique. Les résultats issus de la simulation ont été présentés et discutés à la dernière partie de ce chapitre.

Le dernier chapitre est consacré modélisation et à la commande de la chaîne de production d'énergie éolienne tout en donnant le modèle de chaque composant de la chaîne considéré. Les résultats issus de la simulation de ce chapitre ont été présentés, analysés et discutés à la fin partie de ce chapitre.

CHAPITRE I

Généralités sur l'énergie renouvelable

I.1 Introduction

La croissance de la consommation d'énergie électrique mondiale ne cesse d'augmenter et les effets néfastes principalement causés par l'épuisement, l'incertain et l'instabilité des prix des énergies fossiles, l'environnement, l'émission, de gaz à effet de serre, la libéralisation du marché électrique et de service sont au cœur de la problématique du réchauffement climatique et du développement durable qui présente l'une des possibilités d'accroître le taux de production d'électricité à partir des énergies non fossile et renouvelable et pour diminuer la pollution qui présentent aussi des préoccupations majeures pour les acteurs mondiaux pour l'intégration et le développement des énergies renouvelables. Elles ont atteint une maturité technique qui leur permet de devenir un segment important de l'industrie de l'énergie et les sources d'énergie renouvelables sont devenues aujourd'hui un sujet d'intérêt dans notre société. Cependant, en raison de leur dépendance aux conditions météorologiques, les sources renouvelables imposent de nouveaux défis au système électrique.

Les énergies renouvelables (énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse et géothermique) ne représentent actuellement qu'environ 20% de la production mondiale d'électricité. Dans ce contexte, l'énergie renouvelable est un avenir énergétique avancé comme source alternative, propre et inépuisable émerge de ces défis.

Le présent chapitre décrit d'une manière générale les différents systèmes d'énergies renouvelables destinés à la production de l'énergie électrique, leurs technologies, architectures et leur principe de fonctionnement toute en donnant leurs avantages et inconvénients.

I.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées. On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes »

ou « énergies propres ». Le faible impact environnemental de leur exploitation en fait un élément majeur des stratégies des entreprises en matière de développement durable.

I.3 Énergies renouvelables, efficacité énergétique, intermittence et stockage

En effet, les énergies renouvelables sont parfois critiquées pour leur plus faible efficacité énergétique par rapport aux énergies fossiles. Les coûts de production sont également souvent considérés comme plus élevés à court terme. Mais surtout, elles sont caractérisées par une disponibilité plus aléatoire : par exemple, le solaire et l'éolien ne produisent pas en permanence de l'électricité. On appelle ce phénomène l'intermittence : une éolienne ne produit que par intermittence, quand il y a du vent.

De ce fait, pour être utilisables à grande échelle, les énergies renouvelables intermittentes doivent être accompagnées d'une infrastructure de stockage d'électricité. Autrement dit, il faut être capable de stocker l'énergie que l'on produit en surplus pendant les périodes propices (quand il y a beaucoup de soleil et de vent) afin de la redistribuer pendant les périodes creuses, où la production est basse. Cela implique donc de construire des batteries ou des systèmes de stockage complexes qui nécessitent de nombreuses ressources naturelles et augmentent la pollution liée aux énergies renouvelables

I.4 Les différents types d'énergies renouvelables

A l'heure actuelle, Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes. Donc, Il est urgent de réagir pour utiliser intelligemment toutes les ressources naturelles pour remédier aux grandes catastrophes tant écologiques qu'économiques. La prise en compte de l'environnement fait son entrée dans la politique mondiale pour la préservation de notre planète. Les énergies renouvelables sont inépuisables et environnementale face aux énergies fossiles émetteur de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz nocifs provoquant l'accroissement de l'effet de serre et entraînant des catastrophes climatiques comme le réchauffement de la planète, la destruction de la couche d'ozone. Pour cela, on doit penser à d'autres modes de comportement dans nos consommations et surtout prospecter d'autres sources d'énergies moins dangereuses pour notre environnement.

Les technologies des énergies renouvelables n'ont pour la plupart pas encore atteint une maturité suffisante pour entrer en compétition avec les énergies classiques sur une grande échelle. Il existe bien sûr une exception qui est l'hydroélectricité, ainsi que certaines formes d'énergies renouvelables qui commencent à être économiquement viables.

I.4.1 Les contraintes techniques

Les contraintes techniques sont principalement de trois ordres :

- Une densité de puissance disponible relativement faible comparativement aux énergies non renouvelables, ce qui implique de grandes surfaces de captation et un coût matière élevé ;
- La grande variabilité de la source : l'énergie solaire ou éolienne, l'hydraulique, l'énergie des mers fluctuent largement. Il faut capter quand l'énergie est disponible, ce qui nécessite des régulations souvent complexes ;
- La nécessité de stocker, se présentant comme des énergies flux, elles nécessitent un stockage pour la plupart des applications, ce qui pose problème, car on ne sait pas aujourd'hui stocker l'énergie dans de bonnes conditions.

I.4.2 Les contraintes techniques

Les contraintes économiques sont doubles :

- Un **coût d'investissement élevé**. Même lorsqu'elles sont bien maîtrisées, comme par exemple l'hydroélectricité, ces technologies restent relativement coûteuses en investissement, alors que leur coût d'exploitation est généralement faible ;
- La **nécessité d'un appoint**. En cas d'indisponibilité de la source, il faut souvent qu'une autre énergie prenne le relais, imposant des surcoûts quelquefois conséquents.

Leur développement passe par la maîtrise de leur complexité et des mécanismes de financement appropriés, qui peuvent être difficiles à mettre en place au niveau décentralisé.

Selon leur origine, on peut distinguer cinq grandes catégories d'énergies renouvelables :

- L'énergie géothermique, fournie par la terre;
- Les énergies solaires directes (thermique, photovoltaïque);
- Les énergies solaires indirectes (éolienne, hydraulique, biomasse);
- L'énergie de la mer;
- L'énergie des animaux.

I.5 Conversion d'Énergie éolienne

Les sources d'énergie renouvelables sont devenues aujourd'hui un sujet d'intérêt dans notre société. L'énergie éolienne a de nombreux avantages face au combustible fossile, ce qui explique, sa forte croissance ces dernières années. L'énergie éolienne est une source d'énergie propre qui ne pollue pas l'air comme les centrales électriques. L'énergie éolienne est une énergie solaires indirectes en ce sens qu'elle est générée par les mouvements des masses d'air et d'eau résultant du réchauffement cyclique de la terre par le soleil. L'énergie éolienne correspond à l'énergie cinétique des masses d'air se déplaçant entre des zones à pressions différentes. L'énergie du vent a ainsi été captée depuis l'antiquité, soit dans des éoliennes à axe horizontal (moulins) ou vertical, soit pour la propulsion des navires à voile.

I.5.1 Énergie éolienne

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est l'une des méthodes qui connaissent une croissance rapide dans le monde. L'énergie éolienne est une énergie constamment renouvelable et elle est exploitée pour produire de grandes quantités d'électricité au moyen d'un aérogénérateur, plus communément appelée éolienne qui est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission, puis en énergie électrique via un générateur électromagnétique couplé à l'éolienne. Le couplage mécanique peut être soit direct ou indirect suivant l'application.

A ce jour, les éoliennes les plus répandues sur le marché restent les éoliennes à axe vertical dont le succès est dû au fait qu'elles présentent un profil de production très intéressant. Un autre aspect, moins visible, mais qui a toute son importance, est celui des petites unités de production. En effet, ces dernières sont de plus en plus prisées pour des fonctionnements autonomes pour assurer l'alimentation des sites isolés et/ou autonomes ou encore, avec l'apparition de nouvelles architectures à axe vertical, pour l'exploitation en milieu urbain. Quelle que soit la machine utilisée, le fonctionnement en générateur autonome se distingue par des contraintes et des spécificités autres que celles rencontrées dans le cas des grandes centrales éoliennes.

En effet, la préoccupation principale de ce fonctionnement est le maintien de l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes, quelles que soient la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée dans une certaine plage. Ceci passe alors par la mise en œuvre d'une commande du système éolien [7].



Fig. 1. Eoliennes en fonctionnement

A la différence du pétrole, du gaz naturel ou du nucléaire, la notion de filière est peu utilisée pour l'énergie éolienne dans son ensemble, bien qu'on puisse aussi y faire référence, ou bien elle est utilisée pour désigner la filière industrielle de fabrication des éoliennes elles-mêmes.

La première étape de la mise en exploitation de l'énergie éolienne est ici aussi l'identification de la ressource, l'estimation de ce que l'on appelle le potentiel éolien, qui résulte d'une part d'études orographiques et d'autre part d'une cartographie des données climatologiques, permettant de connaître la quantité d'énergie éolienne disponible sur un territoire (terrestre ou marin) donné. Il est lié à la force et à surtout à la régularité des vents qui ne doivent être ni trop forts, ni trop faibles, et varie en fonction de la rugosité du lieu d'implantation qui génère des turbulences plus ou moins fortes.

L'étape de production consiste à réaliser tous les travaux de génie civil nécessaires à l'installation des éoliennes et à les exploiter. Si l'électricité produite n'est pas consommée sur place, elle doit être transportée, ce qui se fait en utilisant le réseau électrique.

Elle peut aussi quelquefois être stockée, généralement dans des batteries, mais cette solution est limitée aux petites installations, l'électricité étant très difficile et très coûteuse à stocker.

I.6 Énergie solaire

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. L'énergie solaire provient des réactions thermonucléaires qui se produisent au sein du soleil, provoquant l'émission d'un rayonnement électromagnétique de très forte puissance. Le soleil est une source d'énergie presque inépuisable car le rayonnement reçu par la terre varie selon la période de l'année entre 1350 et 1450 W/m^2 . Il est ensuite partiellement réfléchi et absorbé par l'atmosphère, de telle sorte que le rayonnement reçu au sol comporte une part directe et une part diffuse, le total variant entre 200 W/m^2 (ciel couvert), et environ 1000 W/m^2 (au zénith par ciel clair) [5]. La simulation des systèmes à énergie solaire" permet et fournit des méthodologies de calcul permettant d'estimer la ressource solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- ✚ Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- ✚ Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques): la chaleur des rayons solaire est captée est rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité.

La plupart des utilisations sont simples, dans des domaines aussi divers que l'agriculture, par la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et de chauffage. Ces derniers sont abondants sur toute la surface de la terre et il y en a encore beaucoup qui atteignent la surface de la terre. On peut donc compter sur 1000 W/m^2 dans les régions tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est légèrement polluée par de la poussière ou de l'eau [5].

I.6.1 Les différentes technologies solaires

Il existe trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.

I.6.1.1 Solaire à concentration thermodynamique

Une technique qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire dans un tube contenant un fluide caloporteur chauffé à une température de 500 degrés Celsius, ce que l'on appelle l'énergie solaire concentrée (CSP), la thermodynamique. La chaleur résultante est

transférée à un circuit d'eau et la vapeur qui en résulte active une turbine couplée à un générateur qui produit de l'électricité. L'un de ses principaux avantages est la capacité à stocker la chaleur, ce qui permet aux centrales solaires de produire de l'électricité la nuit. Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres au-dessus du sol) représentent une zone d'ombre au sol, mais il y a suffisamment de lumière pour éventuellement faire pousser des fruits ou des légumes et l'utilisation d'une partie de l'eau douce formée sur place par condensation à la sortie des turbines pour l'irrigation.

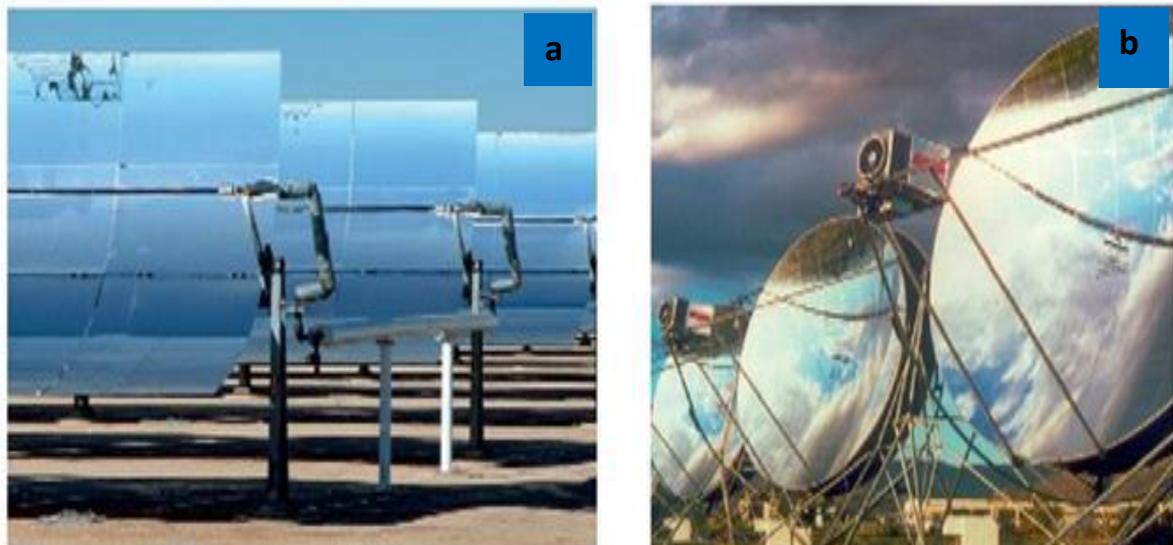


Fig. 1.2. Deux exemples de modules à concentration thermodynamique [5].

(a) Capteurs cylindre- paraboliques, (b) Capteurs paraboliques

La conversion du rayonnement solaire en énergie thermique à l'aide d'un liquide circulant dans des panneaux exposés au soleil nous donne le principe de l'énergie thermique (Figure I.3). La conversion d'énergie peut être directe si l'on veut seulement chauffer de l'eau saine, par contre, si l'on veut produire de l'électricité, on aura recours à des générateurs qui transforment l'énergie thermique en électricité (par exemple, des moteurs à air chaud). Sa principale source est le soleil et il sert à chauffer les bâtiments ou à chauffer de l'eau saine.

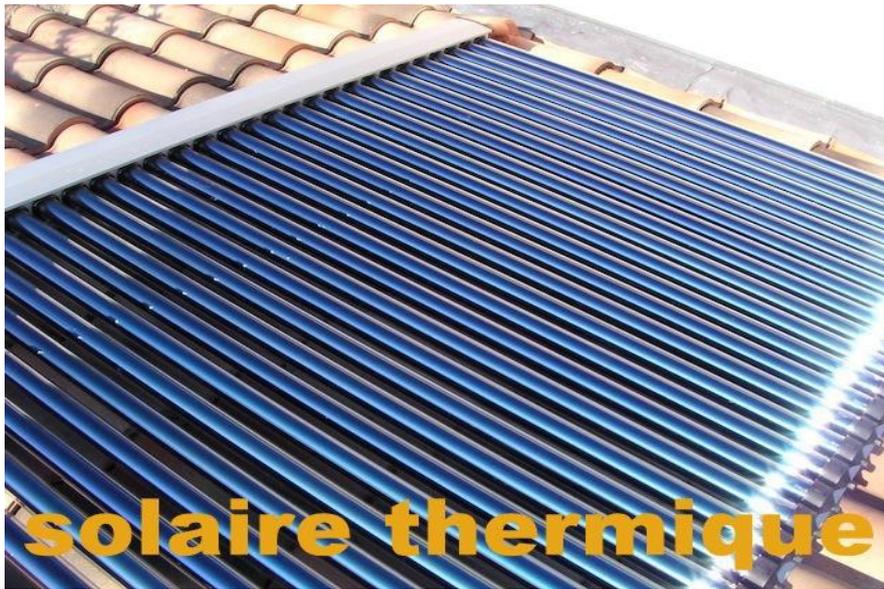


Fig. 1.3 L'énergie solaire thermique [5].

I.6.1.2 Solaire photovoltaïque :

Le solaire photovoltaïque (PV) utilise le soleil comme une source primaire en convertissant l'énergie des photons en électricité. La lumière du soleil (photons) transfère son énergie en électrons à base d'un semi-conducteur qui constitue une cellule photo électrique) ou l'effet photo électrique est transféré en électricité sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans carburant. Le physicien français A. Becquerel a découvert l'effet photo électrique en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « image » (du mot grec « photo » signifiant « lumière ») et du mot « volt » (le paternalisme du physicien Alessandro Volta qui a fait une contribution très importante à la recherche électrique) [5].



Fig. 1.4. Les panneaux photovoltaïques [4].

I.7 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie solaire indirecte en ce sens qu'elle est générée par les mouvements des masses d'air et d'eau résultant du réchauffement cyclique de la terre par le soleil. L'énergie hydraulique correspond à l'énergie potentielle que possède en altitude l'eau des fleuves et rivières. Elle résulte de l'action du soleil à travers le cycle de l'eau, évaporée de la surface de la terre, puis condensée sous forme de pluie. On distingue généralement la grande hydraulique et la micro-hydraulique, ou énergie hydraulique de petite puissance (inférieure à 8 MW).

L'énergie cinétique de l'eau (fleuves et rivières, barrages, courants marins, marées) actionne des turbines génératrices d'électricité. Les énergies marines font partie des énergies hydrauliques. L'énergie potentielle des flux d'eau est exploitée pour incarner l'énergie chromatique. L'énergie cinétique du courant d'eau est convertie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par l'alternateur.

La première étape de la mise en exploitation de l'énergie hydraulique est aussi l'identification de la ressource, l'estimation de ce que l'on appelle le potentiel hydroélectrique, qui résulte d'une part d'études géologiques et orographiques, et d'autre part d'une cartographie des données hydrologiques, permettant de connaître les débits des cours d'eau et les niveaux d'eau des lacs et retenues naturelles et artificielles.

Il faut noter que les impacts environnementaux de l'énergie hydraulique peuvent être très variables. Ils sont faibles s'il s'agit d'exploiter les chutes d'eau naturelles, mais ils deviennent très importants s'il s'agit de créer des barrages et des retenues d'eau artificielles. Il en résulte que, dans les projets de création de nouveaux barrages, la production d'hydroélectricité est, la plupart du temps, secondaire par rapport à d'autres aspects tel que la domestication d'un cours d'eau (évitement des inondations) ou l'alimentation en eau des populations.

L'étape de production consiste à réaliser tous les travaux de génie civil nécessaires à l'installation des centrales hydroélectriques et à les exploiter. Si l'électricité produite n'est pas consommée sur place, elle doit être transportée, ce qui se fait en utilisant le réseau électrique.

Elle peut aussi quelquefois être stockée, généralement dans des batteries, mais cette solution est limitée aux petites installations, l'électricité étant très difficile et très coûteuse à stocker.



Fig. 1.5. Barrage sur rivière destiné à la production d'énergie

I.8 Energie géothermie

Cette énergie est issue de la chaleur émise par la terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories sont exploitées directement ou converties en électricité. En fonction du niveau de température disponible pour le fonctionnement on distingue trois types d'énergie :

- Géothermie à haute énergie.
- Géothermie basse énergie.
- Très faible énergie géothermique

I.9 Energie de la biomasse

On appelle biomasse l'ensemble des matériaux organiques, d'origine principalement végétale, naturelle ou cultivée, terrestre ou marine, provenant de la conversion chlorophyllienne de l'énergie solaire, à l'exclusion des combustibles fossiles. La biomasse produit trois types de ressources : forestière, agricole et aquatique. Elle est principalement composée de lignine, de carbohydrates, cellulose et hémicellulose.

L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques). On en distingue trois catégories principales :

- Le bois
- Le biogaz
- Les biocarburants

La photosynthèse est la propriété que possèdent les plantes, grâce à l'action de la chlorophylle, de convertir le rayonnement électromagnétique en énergie chimique. Celle-ci, stockée essentiellement dans les végétaux sous forme de glucides, c'est-à-dire de sucre, sert à leur croissance et à leur reproduction.

Sous l'action du rayonnement solaire, le gaz carbonique de l'air et l'eau puisée dans le sol sont transformés en glucides dont dérivent ensuite tous les composants de la matière organique.



Fig.1.6. Photosynthèse

Le rendement maximum de la bioconversion n'excède pas 6 %, mais, compte tenu de la surface couverte par les végétaux, cela représente des quantités d'énergie considérables.

La biomasse se retrouve en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles, etc.), le biogaz, les déchets solides ménagers renouvelables et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétale, etc.). Le processus commence par la production de chaleur par combustion, qui conduira à chauffer un réservoir d'eau, qui produira alors de la vapeur à la manière d'un autocuiseur. Cette vapeur d'eau sera ensuite libérée à haute pression, permettant de faire fonctionner une turbine reliée à l'alternateur qui permettra la production de l'électricité [5].



Fig. 1. 7. Différents types de l'énergie biomasse

I. 10 Énergie de la mer

L'énergie de la mer peut provenir de différentes sources :

- Du soleil, soit indirectement du fait du vent qui donne naissance aux vagues, soit directement du fait du gradient thermique existant entre la surface des mers chaudes et l'eau profonde, qui permet d'actionner un cycle thermodynamique à bas écart de température. On parle alors de conversion de l'énergie thermique des mers, ou en anglais d'ocean thermal energy conversion. Les dispositifs de conversion en sont encore, dans ces deux cas, au stade de prototypes ;
- De la gravitation, du fait des mouvements relatifs de la terre, de la lune et du soleil, qui créent les marées. On parle alors d'énergie marémotrice. Peu de sites cependant permettent de franchir le seuil de rentabilité pour ces installations.

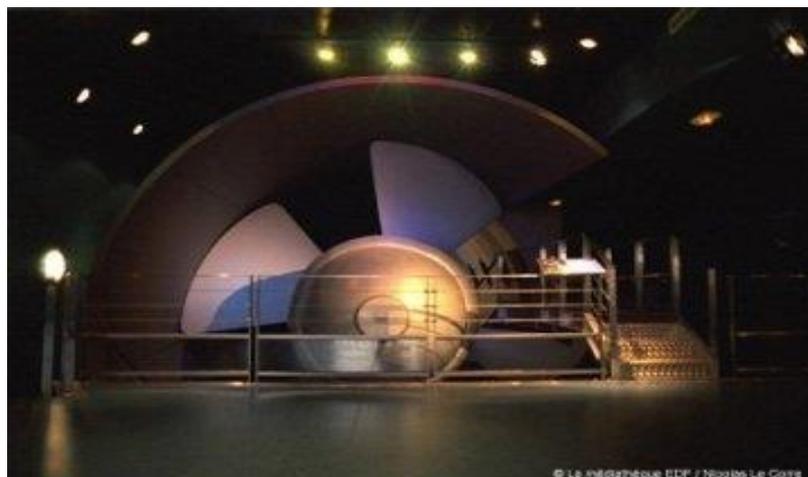


Fig. 1. 8. Bulbes de conversion de l'énergie thermique des

I.11 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

L'exploitation des énergies renouvelables génère théoriquement peu de polluants : notamment, l'électricité d'origine renouvelable émet très peu de CO₂ notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles comme le charbon. Pour cette raison, les énergies renouvelables sont notamment un vecteur privilégié de la lutte contre le réchauffement climatique. Elles sont aussi considérées comme un facteur de résilience car elles permettent des productions décarbonnées et décentralisées.

I.12 Stockage thermique ou pneumatique de l'énergie

L'énergie est d'une manière générale très difficile à stocker, sauf sous forme de carburants, notamment liquides. On ne sait pas aujourd'hui stocker dans des conditions économiques de grandes quantités d'électricité, ce qui oblige les gestionnaires des parcs de centrales électriques à moduler leur production pour répondre à une demande qui fluctue fortement, que ce soit au niveau journalier ou saisonnier. Cet exercice comporte toutefois des limites et a un coût, de telle sorte que les tarifs de l'électricité varient fortement selon les heures.

En complément du stockage hydraulique plusieurs systèmes ont été proposés pour déplacer une consommation d'électricité en heures creuses par une production durant les heures de pointe, par exemple en comprimant de l'air lorsque l'électricité est bon marché, et en turbinant cet air lorsqu'elle est chère, l'association d'un tel stockage pneumatique avec un stockage thermique pouvant améliorer les performances du système.

Le stockage d'énergie thermique peut se faire de plusieurs manières :

- Par chaleur sensible : eau, huiles synthétiques, vapeur d'eau sous pression, sels fondus sans changement de phase, céramiques, béton, etc. ;
- Par chaleur latente : transitions de phases solide-liquide, liquide-vapeur, solide-vapeur ou solide-solide de matériaux divers (eau, paraffines, sels, métaux, etc.) ;
- Sous forme thermochimique par réactions chimiques endo ou exothermiques, adsorption, absorption.

Le stockage sous forme pneumatique consiste quant à lui à comprimer un gaz lors de la phase de stockage, pour le détendre ensuite pendant la phase de déstockage. Le gaz le plus souvent considéré pour cela est l'air. Ces deux formes de stockage peuvent être couplées pour obtenir de meilleures performances. Presque toujours, l'efficacité du stockage thermique

ou pneumatique est relativement faible, aussi le recours à un tel stockage ne se justifie généralement que dans deux cas :

- Lorsque la ressource est variable et non synchronisée avec les besoins. C'est typiquement le cas des installations solaires ;
- Lorsque le prix de l'énergie varie beaucoup d'une période à l'autre. Il peut alors être intéressant de stocker en heures creuses pour déstocker pendant les heures de pointe.

1.13 Les énergies renouvelables ont une priorité en Algérie

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs.

Le programme inclut la réalisation, d'ici 2030, d'une soixantaine de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques, de fermes éoliennes et de centrales hybrides. Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national.

L'Algérie vise à développer une véritable industrie du solaire associée à un programme de formation et de capitalisation qui permettra, à terme, d'employer le génie local algérien et d'asseoir un savoir-faire efficient, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme EnR, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects.

Aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, presque exclusivement, par les hydrocarbures, notamment le gaz naturel, énergie la plus disponible. Il n'est donc fait appel aux autres formes d'énergie que lorsque le gaz ne peut pas être utilisé. A long terme la reconduction du modèle national de consommation énergétique actuel peut rendre problématique l'équilibre offre-demande pour cette source d'énergie.

I.14 Programme des énergies renouvelables

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des 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 programme 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. L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

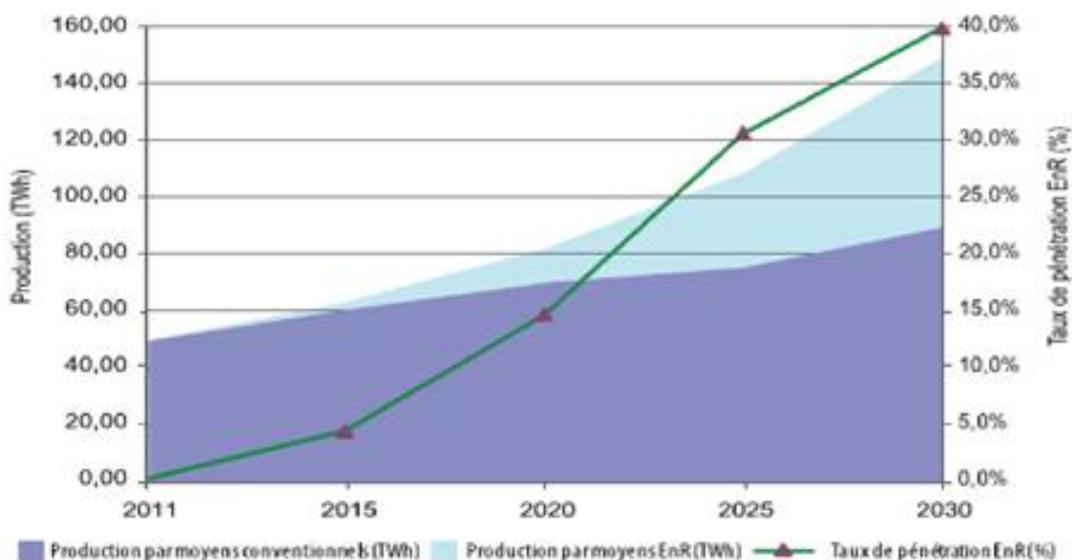


Fig. 1. 9. Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh

Le programme des énergies renouvelables est défini ainsi pour les différentes phases que d'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12 000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10 000 MW [1].

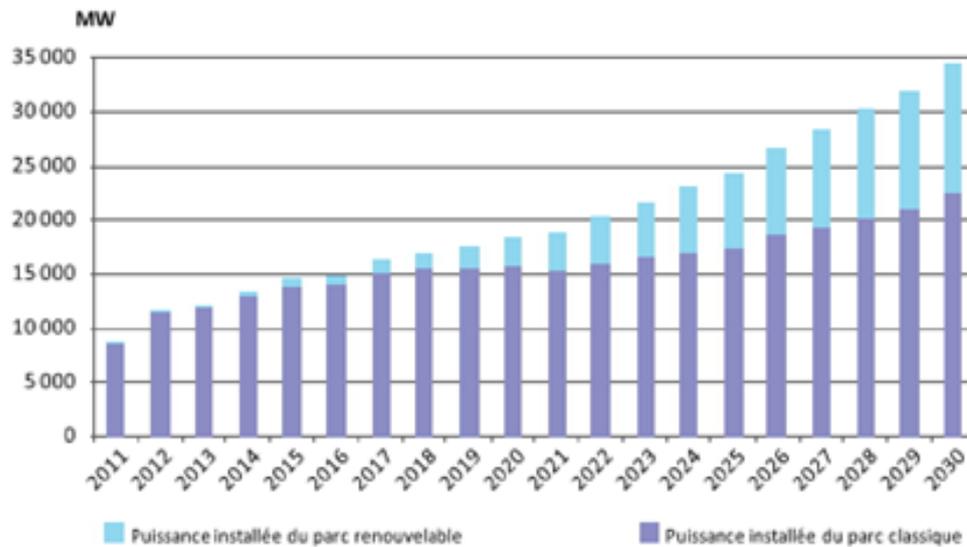


Fig.1. 10. Structure du parc de la production

I.15 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit d'une manière générale les différents systèmes d'énergies renouvelables destinés à la production de l'énergie électrique, leurs technologies, architectures et leur principe de fonctionnement tout en donnant les avantages et les inconvénients. Ainsi, nous avons présenté le programme très riche des énergies renouvelables prévues par notre pays en ce qui concerne l'exploitation du gisement solaire et surtout le photovoltaïque qui va occuper une place importante dans la production locale de l'énergie électrique dans les années à venir.

CHAPITRE II

Constitution d'une éolienne

II.1 Introduction

Les sources d'énergie renouvelables sont devenues aujourd'hui un sujet d'intérêt dans notre société. L'énergie éolienne a de nombreux avantages face au combustible fossile, ce qui explique, sa forte croissance ces dernières années. L'énergie éolienne est une source d'énergie propre qui ne pollue pas l'air comme les centrales électriques. Le faible impact environnemental de l'énergie éolienne en fait une solution très attractive, pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la génération de l'énergie électrique connaît un grand essor. L'électricité consommée dans le monde est surtout d'origine fossile. Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) sont responsables des émissions de gaz à effet de serre qui augmentent le réchauffement climatique.

Actuellement, l'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique, aussi bien pour des sites isolés que comme appoint pour les réseaux connectés. Elle peut être une alternative compétitive contribuant à la réduction de la demande de plus en plus galopante de l'électricité. Le développement et la multiplication de l'utilisation de chaînes de conversion de l'énergie éolienne ont conduit les industriels et les scientifiques à s'investir dans l'amélioration des indices technico-économiques de cette conversion et la qualité de l'énergie fournie.

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est l'une des méthodes qui connaissent une croissance rapide dans le monde. A ce jour, les éoliennes les plus répandues sur le marché restent les éoliennes à axe vertical dont le succès est dû au fait qu'elles présentent un profil de production très intéressant. Un autre aspect, moins visible, mais qui a toute son importance, est celui des petites unités de production. En effet, ces dernières sont de plus en plus prisées pour des fonctionnements autonomes pour assurer l'alimentation des sites isolés et/ou autonomes.

II.2 L'énergie éolienne

Actuellement, l'énergie éolienne est parmi les des énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique pour les sites isolés et connectés aux réseaux. Elle contribue positivement à la réduction de la demande de l'électricité. Le développement et la multiplication de l'utilisation de chaînes de conversion de l'énergie éolienne ont conduit les industriels et les scientifiques à s'investir dans l'amélioration des indices technico-économiques de cette conversion et à l'amélioration de la qualité de l'énergie fournie.[03] [04].

L'Algérie compte s'investir dans le domaine de la production électrique par conversion éolienne pour atteindre 3% de la production nationale à l'horizon 2027. Dans ce cadre, le groupe Sonelgaz a déjà confié la réalisation d'une première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW à une compagnie étrangère. L'énergie produite par cette ferme, sera injectée dans le réseau d'électricité de la wilaya d'Adrar [06].

Le potentiel éolien en Algérie est très diversifié. La carte de la figure II.1 publiée par le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) montre que le sud du pays et particulièrement le sud-ouest sont caractérisés par des vitesses du vent qui varie entre 4 m/s et 6 m/s, tandis que les sites côtiers d'Oran, de Bejaïa et d'Annaba, les hauts plateaux des régions de Tiaret et El-Kheiter et la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur des éoliennes est bien choisie. Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour l'installation des parcs éoliens pour alimenter certaines régions isolées et leur permettre, grâce à l'énergie éolienne et avoir une autonomie énergétique.

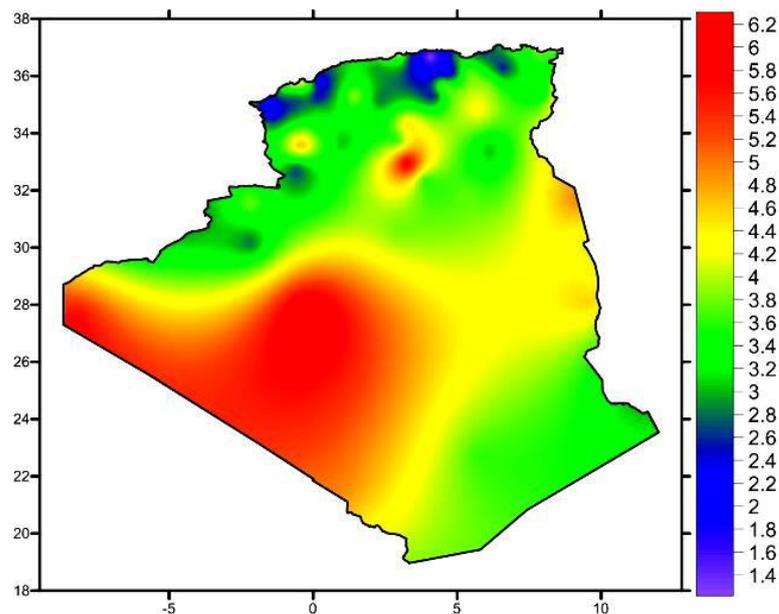


Fig.II.1. Carte du gisement éolien en Algérie (CDER)

II.3 Systèmes de conversion d'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie constamment renouvelable, exploitée pour produire de grandes quantités d'énergie électrique basé sur l'utilisation des aérogénérateurs, plus communément appelée éolienne, qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission, puis en énergie électrique via un générateur électromagnétique couplé à l'éolienne. Le couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et le générateur ont la même grandeur de vitesse, soit par un multiplicateur dans le cas contraire (Figure II.2). L'énergie électrique produite est distribuée à travers les réseaux électriques ou stockée dans des accumulateurs, de la distribuer à travers un réseau électrique, soit de la doter de charges isolées. L'énergie éolienne ne nécessite aucun combustible et ne produit pas de gaz à effet de serre et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. Elle est constamment renouvelable et face au changement climatique qui joue un rôle important la préservation de la biodiversité des milieux naturels [7].

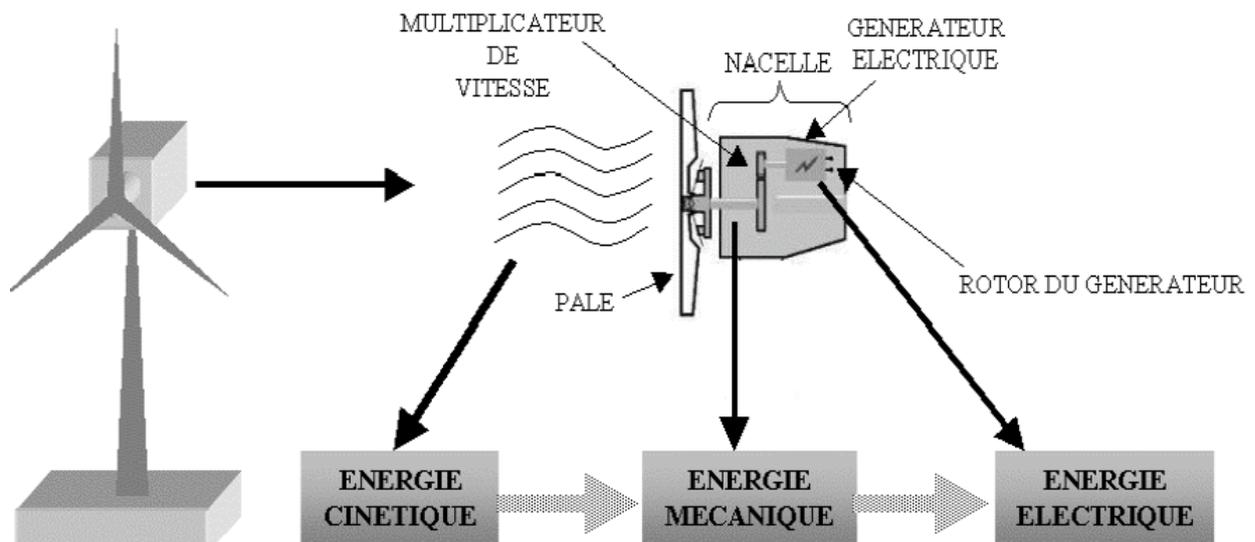


Fig. II.2. Principe de conversion de l'énergie éolienne [7].

II.4 Statistiques et répartition des énergies renouvelables dans le monde

Le protocole de Kyoto oblige les pays signataires à réduire les émissions de gaz à effet de serre qui a contribué à l'émergence de politiques nationales pour développer et fournir de l'énergie à partir des différents procédés existant de production d'énergie électrique. Trois facteurs ont rendu la solution éolienne plus compétitive :

- Développement de l'électronique de puissance ;
- La conception d'éoliennes avec des performances recommandées ;
- Le financement des pays concernés à l'installation de nouvelles éoliennes.

La figure II.3 montre les statistiques et la répartition des différentes énergies renouvelables dans le monde.

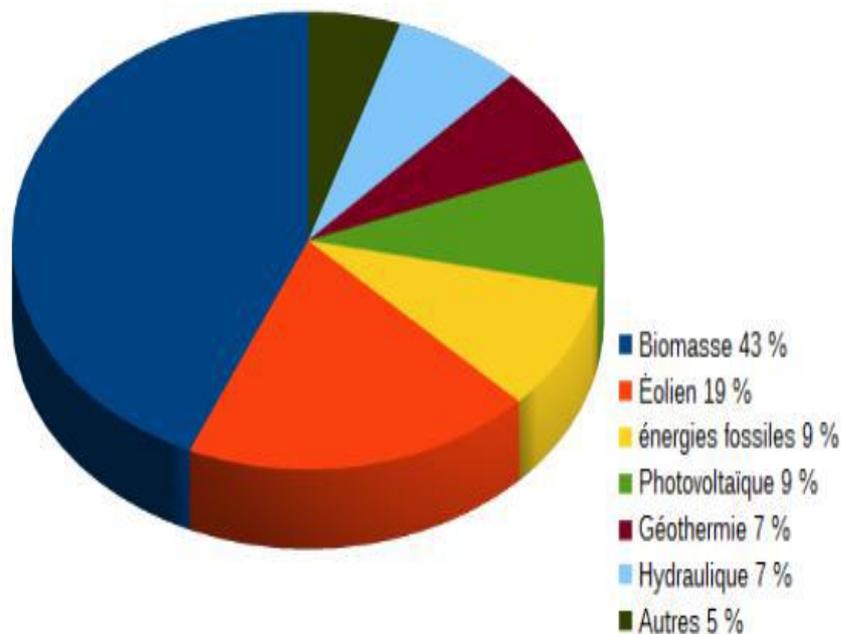


Fig II. 3. Répartition des énergies renouvelables dans le monde

II.5 L'énergie éolienne en Algérie

Notre pays est riche en terme d'énergie renouvelable et possède une variété de cette énergie dont l'énergie éolienne fait partie. Cette dernière varie considérablement d'un endroit à un autre, Cela est dû principalement au terrain et au climat extrêmement diversifiés. Notre pays est divisé en deux grandes régions géographiques distinctes. Le nord de la méditerranée qui est caractérisé par un littoral de 1200 km de long, les deux chaînes de montagnes de l'Atlas et du Sahara, des plaines et des hauts plateaux au climat continental. Cependant, le sud est caractérisé par un climat désertique avec des vitesses plus élevées

que le nord, en particulier le sud-ouest avec des vitesses de plus de 4 m/s, qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région de Adrar.

Au nord de l'Algérie, la vitesse du vent est faible par rapport au sud. Cependant, on remarque la présence de microclimats dans les localités côtières d'Oran, Bejaia, Annaba, les hauteurs de Tiaret ainsi que dans la zone bordée par Bejaia par le nord et Biskra par le sud dont la valeur moyenne de la vitesse du vent en Algérie est estimée à 10 m/s [8].

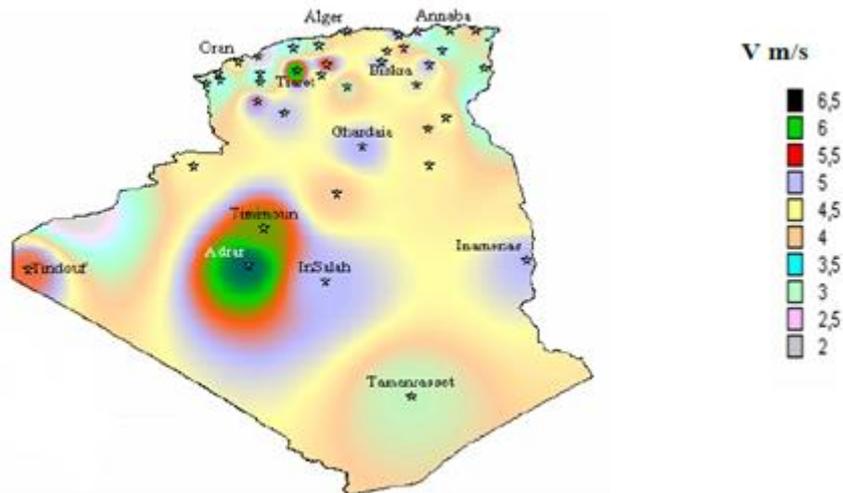


Fig II. 4. La vitesse de vent en Algérie

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

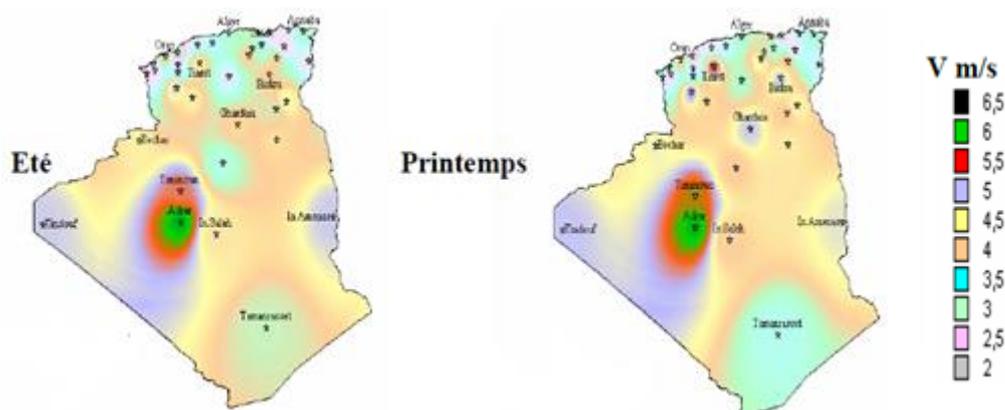


Fig II. 5. La vitesse du vent en saison été et printemps

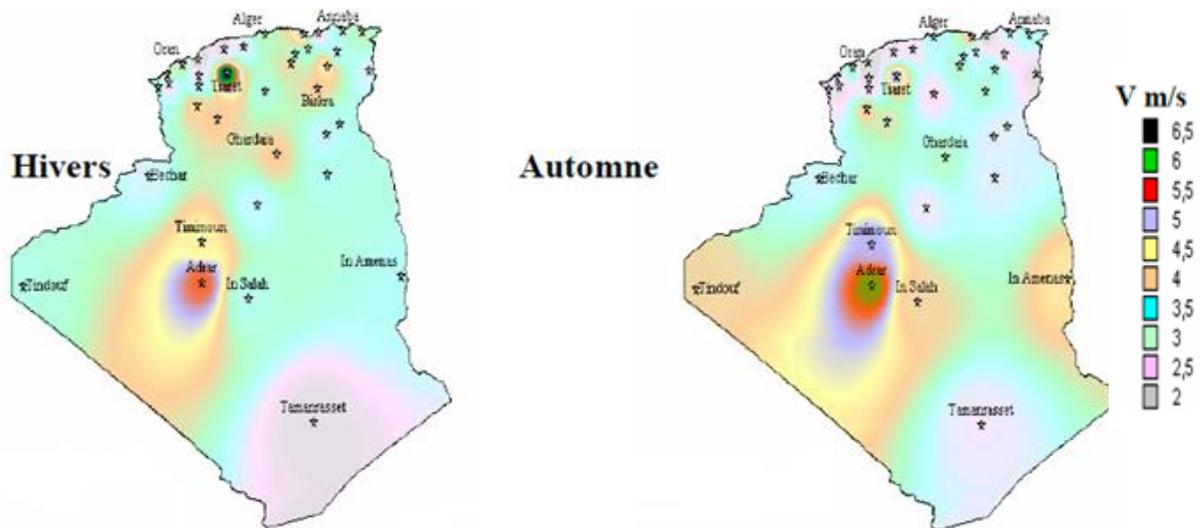


Fig II. 6. La vitesse du vent en saison d'hiver et automne

II.6 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en général en deux grands groupes selon l'axe sur lequel est montée à l'hélice :

- Eolienne à axe verticale
- Eolienne à axe horizontal.

II.6.1 Eolienne à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour, mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles : les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924) [06 foulah]

II 6.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur (Figure. II.7) est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.



Fig II. 7. Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)

II 6.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Ce type aérogénérateurs (Figure II. 8) sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure [12].



Fig II .8. Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)

II.6.1.2.1. Avantages [8] [12][7]

- Faible encombrement ;
- Intégrable au bâtiment, esthétique ;
- Démarre à de faibles vitesses de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus;
- Système peu bruyant ;
- Pas de contraintes sur la direction du vent.

II.6.1.2.2. Inconvénients [8] [12]

- Faible rendement ;
- Masse non négligeable.

II.6.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées avec de diverses constructions qui utilisent les voilures de deux, trois (les plus courantes) et les multi-pâles (Figure II-9).



Fig. II. 9. Eoliennes tripales et multi-pâles [12]

Cependant, les structures les plus courantes sont tripales et consistent en une hélice éolienne verticale montée sur un mât, dont les pales sont définies aérodynamiquement comme l'aile d'un avion, de sorte que ce type d'éolienne doit toujours être orienté vers le vent. Par rapport aux turbines à axe vertical, elles ont la même vitesse du vent, de sorte que les éoliennes sont capables de produire plus d'énergie car leurs coefficients de puissance atteignent rapidement leur valeur maximale. De plus, ils ont un coût inférieur et une efficacité accrue en raison de leur emplacement à des dizaines de mètres du sol [13][11].

II.6.2.1 les éoliennes à rotation lente “multiples”

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi exclusivement au pompage de l'eau.

II.6.2.2 Aérogénérateurs

Ce type est destiné principalement à la production d'électricité, d'où son nom aérogénérateurs "et il est utilisé principalement pour la production d'électricité.

II.6.2.1.1 Avantages [8]

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical ;
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.
- Peu de contraintes mécaniques.
- Grande efficacité.

II.6.2.1.2 Inconvénient [8][12]

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas incident.
- Bruit conséquent.
- Vibrations non négligeables.
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

II.7 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : les pales, la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement. Une éolienne est composée de plusieurs éléments représentés sur la Figure II.9 suivante : Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- 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. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [12].

- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le 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)[12].

- Le rotor, 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, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [12].

- Les éoliennes sont généralement équipées d'un système électronique pour contrôler leur fonctionnement général et leur mécanisme de direction. Il permet d'entraîner le démarrage, d'ajuster la température des pales, le freinage ainsi que la direction de la nacelle par rapport au vent.

- La plupart des éoliennes, connectées au réseau ou en fonctionnement autonome utilisent uniquement des dispositifs mécaniques pour commander la puissance électrique débitée. Ces derniers sont :

- Les servomoteurs d'orientation de la nacelle qui permettent de placer cette dernière face au vent lors des phases de fonctionnement,
- Le mécanisme hydraulique qui permet d'orienter les pales afin d'adopter l'angle d'incidence adéquat pour capter une puissance du vent donnée
- L'assise de béton, la fondation, permet de fixer de façon rigide l'ensemble de la structure de l'éolienne.

- Et enfin l'armoire de couplage réalise l'adaptation du courant électrique produit par la nacelle en un courant injectable sur le réseau électrique local.

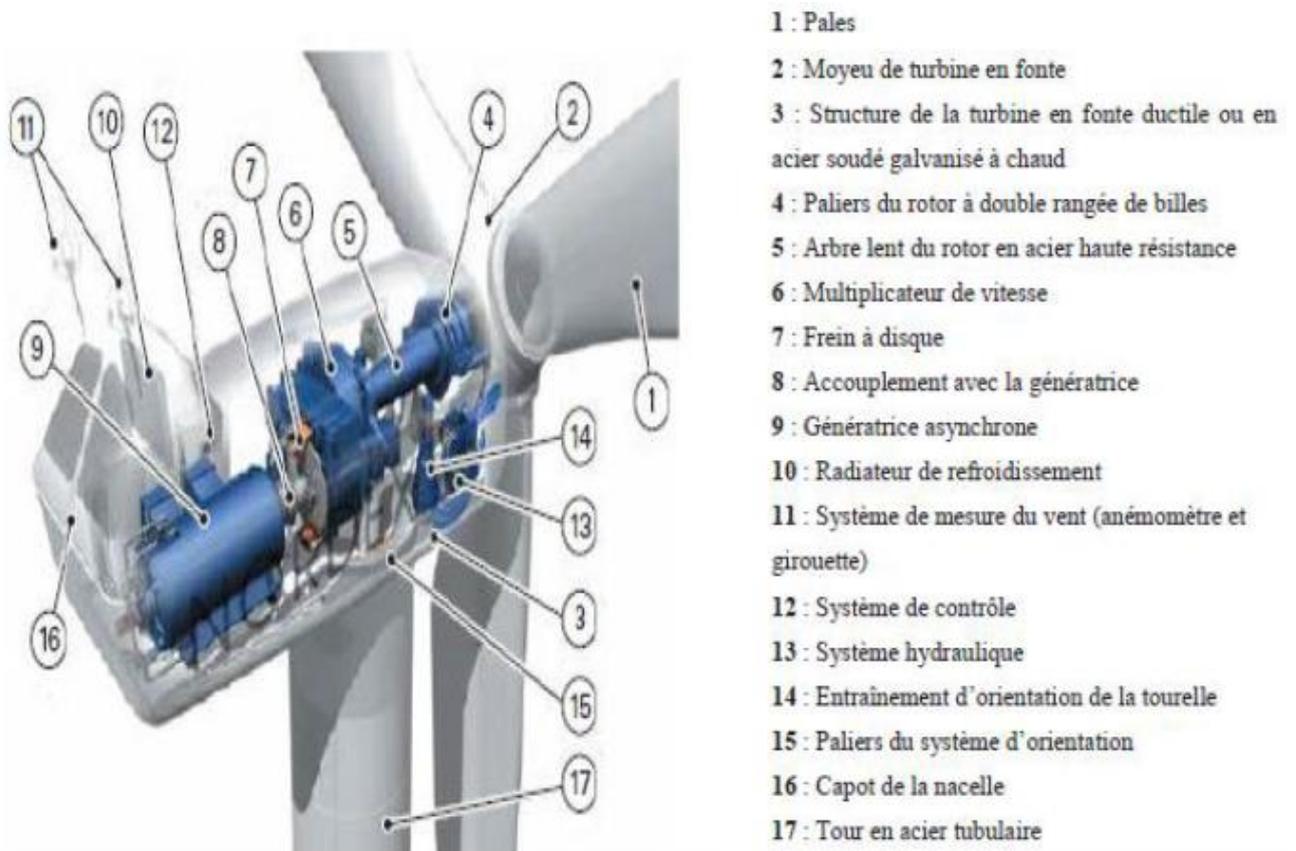


Fig II.10. Constitution d'une éolienne [15]

II.8 Fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant évacuation vers le réseau.

II.9 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part pour protéger l'éolienne des vents forts et d'autre part pour réduire la puissance, les dimensions de l'éolienne sont déterminées pour fournir une puissance nominale P_n à un vent nominal et une vitesse V_n . Les paramètres de la turbine doivent donc être développés afin de fournir La capacité nominale de production ne dépasse la vitesse maximale pouvant endommager la turbine. Quatre régions opérationnelles peuvent être identifiées, figure II.10.

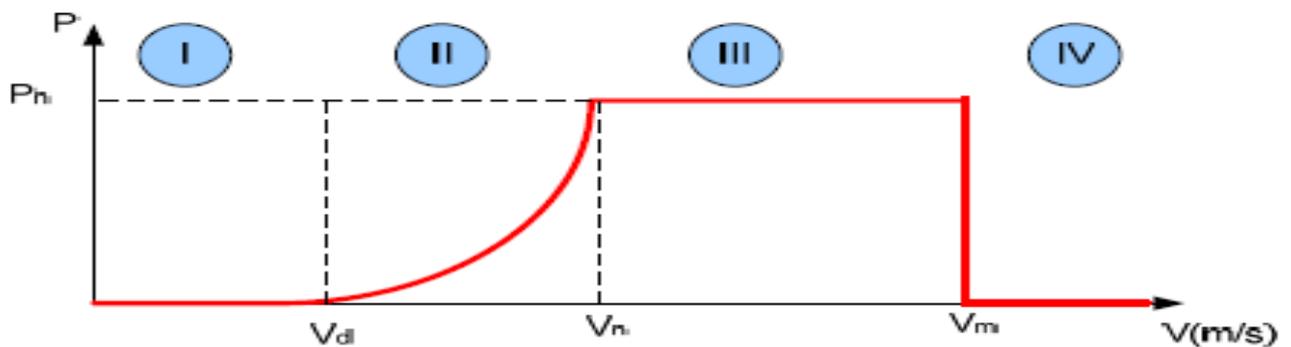


Fig II. 11. Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne classique [16]

- ✚ **Zone I :** La phase de démarrage de la machine. : la production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice. La puissance électrique reste assez faible.
- ✚ **Zone II :** c'est la zone ou étage d'extraction d'énergie maximale. Dans cette zone, la vitesse mécanique exacte peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale. La puissance électrique augmente rapidement. L'angle d'inclinaison de la pale β est fixé à sa valeur minimale pour obtenir le facteur de puissance maximal. Ainsi, la puissance maximale est obtenue pour chaque valeur de vitesse mécanique et de vitesse du vent.
- ✚ **Zone III :** C'est la phase où la vitesse mécanique est quasiment constante. L'angle de pas de pale β varie afin d'obtenir une puissance électrique maximale pour différentes valeurs de vent. L'énergie électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale.
- ✚ **Zones IV:** Niveau de puissance statique (lorsque la vitesse du vent augmente davantage, l'angle d'inclinaison des pales devient grand afin de maintenir la puissance électrique constante et nominale.

II.10 Application éolienne

Le système éolien peut être utilisé dans trois applications distinctes :

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides.
- Les systèmes connectés au réseau.

II.10.1 Systèmes isolés

L'énergie éolienne est utilisée dans les zones éloignées pour leur fournir de l'électricité, elle est utilisée loin des zones chargées pour produire de l'électricité pour les îles, pompage de l'eau. L'énergie est stockée dans des batteries est contrôlée par un dispositif afin d'éviter. L'endommagement des batteries. Pour alimenter des équipements fonctionnant avec un réseau alternatif (AC) ou continu (DC), il est nécessaire d'utiliser d'introduire l'électronique de puissance.

II.10.2 Systèmes hybrides

C'est le système qui englobe et collecte diverses sources d'énergie électrique. Il existe plusieurs groupes de systèmes hybrides, à savoir : éolien - diesel, PV diesel, éolien - photovoltaïque - diesel, ... etc. Il peut être combiné avec d'autres sources de stockage d'énergie, telles que les batteries électrochimiques, le stockage d'hydrogène, les volants d'inertie et les super condensateurs.

II.10.3 Systèmes connectés au réseau

Ces systèmes sont connectés directement aux réseaux électriques et n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie. Ainsi, toute la production est livrée directement au réseau électrique.

II.11 Les différents systèmes utilisés dans l'exploitation de l'énergie éolienne

II.11.1 Systèmes utilisant le générateur synchrone

Le générateur asynchrone en forme de cage d'écureuil est beaucoup utilisé due à son faible coût, son simple construction, sa robustesse et la facilité d'utilisation dans les climats rigoureux. Il existe plusieurs types de configurations qui utilisent la machine asynchrone sous toutes ses formes (machine de bobinage asynchrone), machine asynchrone Cage, machine asynchrone double stator, MADA, etc.) [6]

II.11.2 Systèmes utilisant une machine synchrone

L'avantage d'un générateur synchrone par rapport à un générateur asynchrone est qu'il n'y a pas de courant magnétisant réactif. Le champ magnétique d'un générateur synchrone peut être obtenu par aimant ou par bobine d'excitation classique. Si l'alternateur a un nombre d'arbres suffisant, il est polyvalent pour les applications à entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Cependant, un générateur synchrone est plus adapté pour une connexion indirecte au réseau électrique via un transformateur statique, ce qui permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour les petites unités, un générateur à aimant permanent est plus simple et moins coûteux. Au-delà (environ) 20 kW, un générateur synchrone est plus cher et plus complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente. [17]

II.11.2.1 Machines synchrones à rotor

Utilisent souvent un agitateur attaché à un redresseur de rotor pour supprimer tout contact glissant. Le rotor peut être des électrodes souples ou saillantes et est généralement équipé de circuits étanches. Pour certaines applications à haute puissance et à haute vitesse, les applications à haute vitesse peuvent être éliminées en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à basse vitesse avec un grand nombre de paires de pôles [16].

II.11.2.2 Machines synchrones à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis de construire des machines synchrones à aimants permanents à des coûts devenus compétitifs. Les machines de ce type possèdent un grand nombre d'arbres et permettent de développer un couple mécanique important. L'avantage d'un bon rendement et d'un bon couple mécanique, les inductances à aimants de forte puissance permettent d'obtenir environ 25% de la masse par rapport à celles du type bobiné. Mais leur principal inconvénient est le manque de régulation du débit d'excitation. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance est devenu plus économiquement viable, ce qui en fait un concurrent sérieux des doubles générateurs asynchrones. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance considéré comme aussi faible que l'élimination du multiplicateur de vitesse et le système d'anneaux et de balais des générateurs magnétiques. Ensuite, le coût est plus faible, ce qui est très avantageux dans les applications de l'énergie éolienne, en particulier dans les endroits difficiles d'accès. La présence obligatoire d'une électronique de puissance permet une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une efficacité énergétique améliorée [16].

II.12 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, une brève description de chaînes de conversion de l'énergie éolienne est donnée. Un aperçu succinct des deux grandes familles d'éoliennes, leurs avantages et inconvénients a été donné.

Dans la seconde partie, les différents constituants d'une éolienne sont présentés. Les différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne en utilisant les générateurs synchrones et asynchrones ont été décrit. Après l'étude avantages des éoliennes à base des machines synchrone à aimants permanents par rapport aux autres types de machines, l'idée de consacrer la suite des recherches sur un système utilisant une génératrice synchrone à aimant permanent GSAP a été retenue. Le chapitre suivant est consacré à la présentation et la modélisation mathématique des différentes parties constituant une chaîne de conversion d'énergie éolienne basé sur une GSAP fonctionnant à vitesse variable.

CHAPITRE III

*Modélisation et simulation d'une génératrice
à aimant permanent*

III.1.Introduction

La modélisation des machines électriques est une étape primordiale et très essentielle. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatif sont en général, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Ce non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée - biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

III.2 Modélisation de la GSAP

III.2.1 Hypothèses simplificatrices

La machine synchrone à aimants permanents est un système complexe, dont la modélisation obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encochage négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- On admet que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale [15].

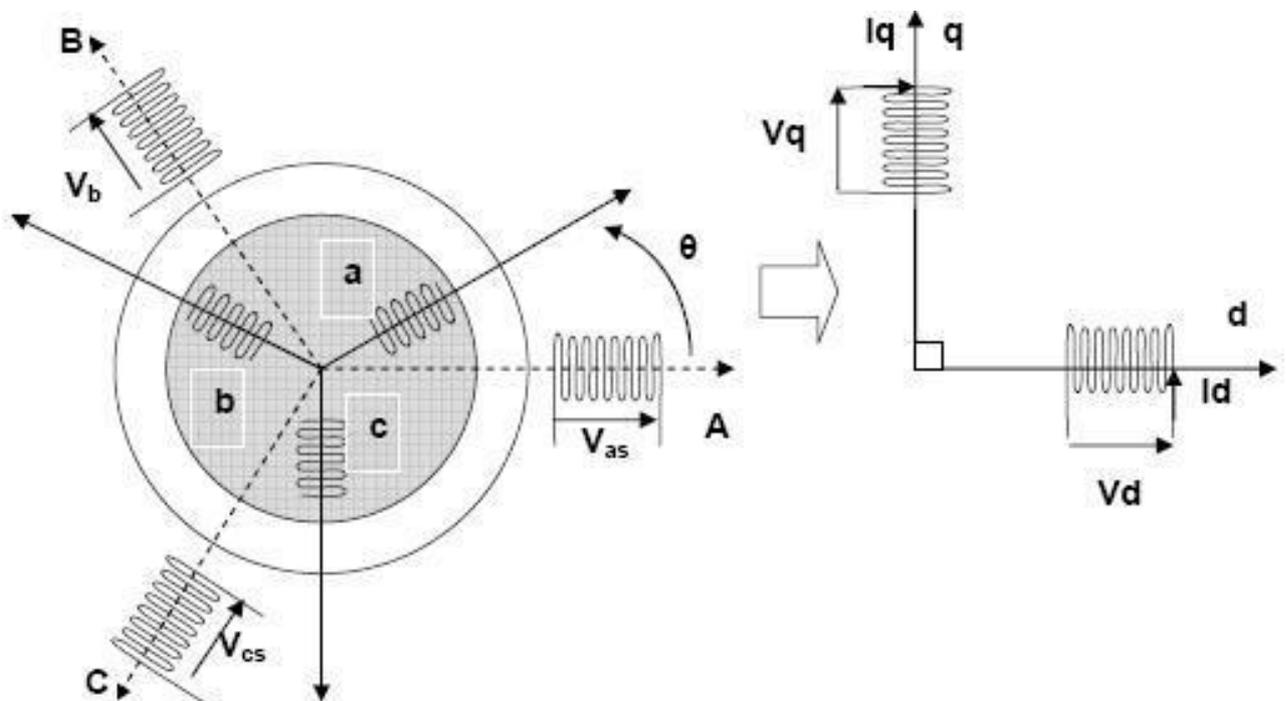


Fig III. 1. Machine équivalente au sens de Park [6]

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par [24] :

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

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

III.2.2. Les équations de tension et flux

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 [24] :

$$\varphi_a = \varphi_f \cos(\theta P) \quad (\text{III.2})$$

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

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

- φ_f : C'est la valeur crête du flux créée par l'aimants permanents à travers les enroulements statorique.

Les équations électriques de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel triphasé sont :

$$[\mathbf{V}_a] = [\mathbf{I}_a][\mathbf{R}_s] + \frac{d\varphi_a}{dt} \quad (\text{III.5})$$

$$[\mathbf{V}_b] = [\mathbf{I}_b][\mathbf{R}_s] + \frac{d\varphi_b}{dt} \quad (\text{III.6})$$

$$[\mathbf{V}_c] = [\mathbf{I}_c][\mathbf{R}_s] + \frac{d\varphi_c}{dt} \quad (\text{III.7})$$

- $[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]$: Vecteurs des flux dans les enroulements statoriques.
- $[\mathbf{R}_s]$: Résistance d'une phase d'enroulement statorique.

III.2.3 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\omega}{dt} = [p(C_m - C_{em})] - F_W \quad (\text{III.8})$$

Et :

$$W = P \Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{III.9})$$

Avec :

C_{em} : Couple électromagnétique (couple moteur).

C_m : Couple moteur appliqué sur la génératrice (couple résistant).

F : Coefficient de frottement.

J : Moment d'inertie.

P : Nombre de paires de pôles.

On voit bien que les systèmes d'équations sont à coefficients variables en fonction de θ . La résolution analytique dans ce repère reste très difficile.

III.2.4 Transformation de PARK

Pour contourner cette difficulté, on introduit la transformation de PARK qui permet le passage d'une machine triphasée alimentée en alternatif et produisant un champ magnétique tournant à un modèle biphasé lié au rotor de grandeurs électriques continues permettant de produire le même champ [6].

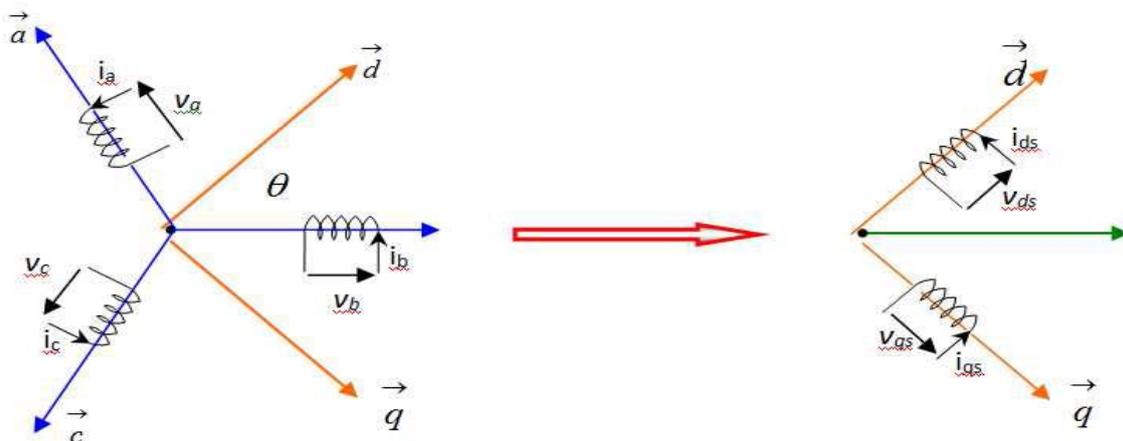


Fig III. 2 . Passage de repère triphasé (abc) au diphasé (dq).

La transformation de Park est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

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 :

$$P[\theta]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

III.2.5 Passage triphasé au biphasé

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

III.2.6 Passage biphasé au triphasé

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P[\theta]^{-1}] \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

III.3. Modélisation de la MSAP dans le repère de Park

III.3.1 Equations électriques

En transformant les équations statoriques dans le repère (d, q) par l'application de la transformation de Park on obtient le système d'équation suivant [15] :

$$V_{dq} = [P(\theta)] [V_{abc}] = [P(\theta)] [R_s] [I_{abc}] + [P(\theta)] \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{III.14})$$

Les composantes de la tension statorique sont données dans le repère de Park par :

$$V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r L_q I_q \quad (\text{III.15})$$

$$V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega_r L_d I_d + \omega_r \phi_f \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$\Theta_q = L_q i_q \quad (\text{III.17})$$

$$\Theta_d = L_d i_d + \phi_f \quad (\text{III.18})$$

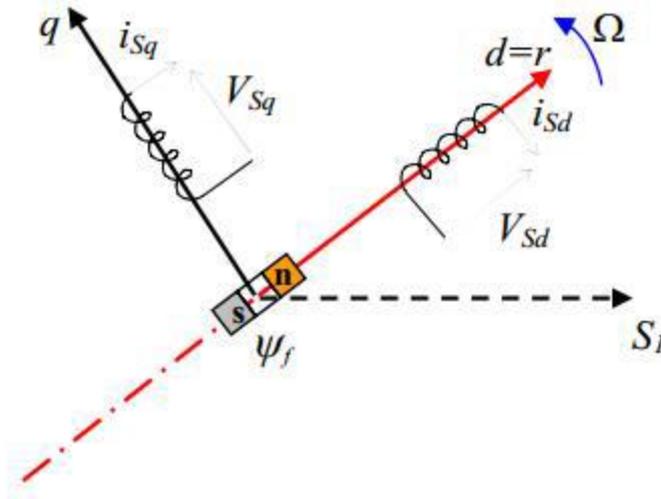


Fig III. 3. Modèle de PARK pour la GSAP

III.4 Calcul de puissance

Comme pour le courant, définissons les projections du phasor \bar{V} :

$$V_d = V \cos(\theta r^\circ - \theta) e^{j\theta r^\circ} = \frac{V_d}{\sqrt{3}} e^{j\theta r^\circ} \quad (\text{III.19})$$

$$V_q = V \sin(\theta r^\circ - \theta) (j\theta r^\circ - \frac{\pi}{2}) = j \frac{V_q}{\sqrt{3}} e^{j\theta r^\circ} \quad (\text{III.20})$$

$$V = V_d + V_q \left(\frac{V_d}{\sqrt{3}} - j \frac{V_q}{\sqrt{3}} \right) e^{j\theta r^\circ} \quad (\text{III.21})$$

La puissance sous forme complexe fournie par la machine est :

$$S = 3 \bar{v} l^* = 3 \left(\frac{V_d}{\sqrt{3}} - j \frac{V_q}{\sqrt{3}} \right) \left(\frac{i_d}{\sqrt{3}} - j \frac{i_q}{\sqrt{3}} \right) = (V_d - j V_q) (i_d - j i_q) \quad (\text{III.22})$$

Dont on obtient :

$$P = V_d i_d + V_q i_q \quad (\text{III.23})$$

$$Q = V_d i_q + V_q i_d \quad (\text{III.24})$$

Il est fort utile d'établir les expressions des puissances active et réactive en fonction de la tension V , de la f.é.m. E_q et de l'angle interne δ de la machine, Pour ce faire, nous négligerons la résistance statorique R_a , qui, en pratique, est très faible devant x_d et x_q .

Sous cette hypothèse, les équations deviennent [15]:

$$V_d = -x_q i_q \Rightarrow i_q = -\frac{V_d}{x_q} \quad (\text{III.25})$$

$$V_q = -x_d i_d + \sqrt{3} E_q \Rightarrow i_d = \frac{V_q - \sqrt{3} E_q}{x_d} \quad (\text{III.26})$$

Avec :

$$V_d = -\sqrt{3} v \sin \delta \quad (\text{III.27})$$

$$V_q = -\sqrt{3} v \cos \delta \quad (\text{III.28})$$

Une substitution de toutes ces relations fournit les expressions recherchées :

$$p = 3 \frac{E_q V}{x_d} \sin \delta + \frac{3V^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta \quad (\text{III.29})$$

$$Q = 3 \frac{E_q V}{x_d} \cos \delta - 3v^2 \left(\frac{\sin^2 \delta}{x_q} - \frac{\cos^2 \delta}{x_d} \right) \sin 2\delta \quad (\text{III.30})$$

Dans le cas d'une machine a rotor lisse, deviennent évidemment :

$$p = 3 (E_q v) / x \sin \delta \quad (\text{III.31})$$

$$Q = 3 (E_q v) / x \cos \delta - (3v^2) / x \quad (\text{III.32})$$

III.5 Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} [(L_q - L_d) i_q i_d + i_q \Phi_f] \quad (\text{III.33})$$

Où :

- P : nombre de paires de pôles
- i_d : courant statorique selon l'axe d
- i_q : courant statorique selon l'axe q
- L_d : inductance statorique selon l'axe d
- L_q : inductance statorique selon l'axe q
- Φ_f : flux inducteur

III.6 Simulation et interprétation des résultats

La figure III.4 présente le schéma bloc du modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP sous le logiciel de simulation Matlab/Simulink qui sera par la suite exploité pour la commande du système éolien considéré. Les paramètres de la machine utilisée sont notés dans l'annexe.

III.6.1. Fonctionnement à vide

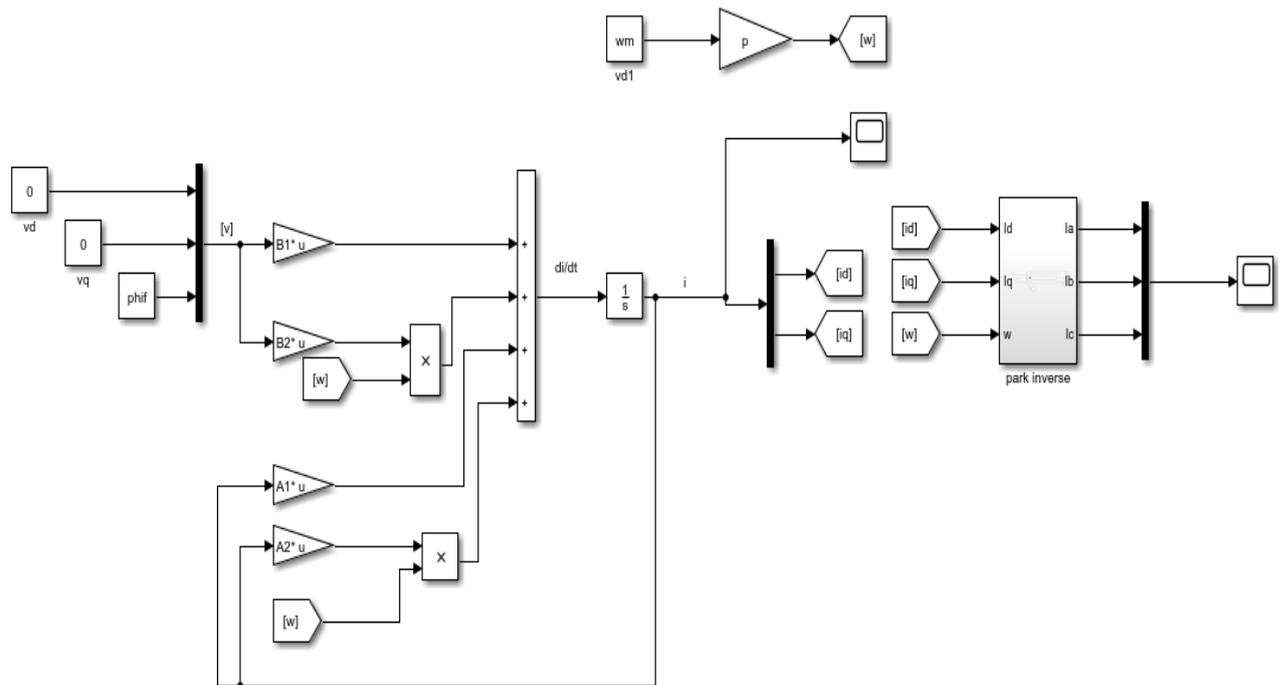


Fig III. 4. Bloc de la simulation de la GSAP

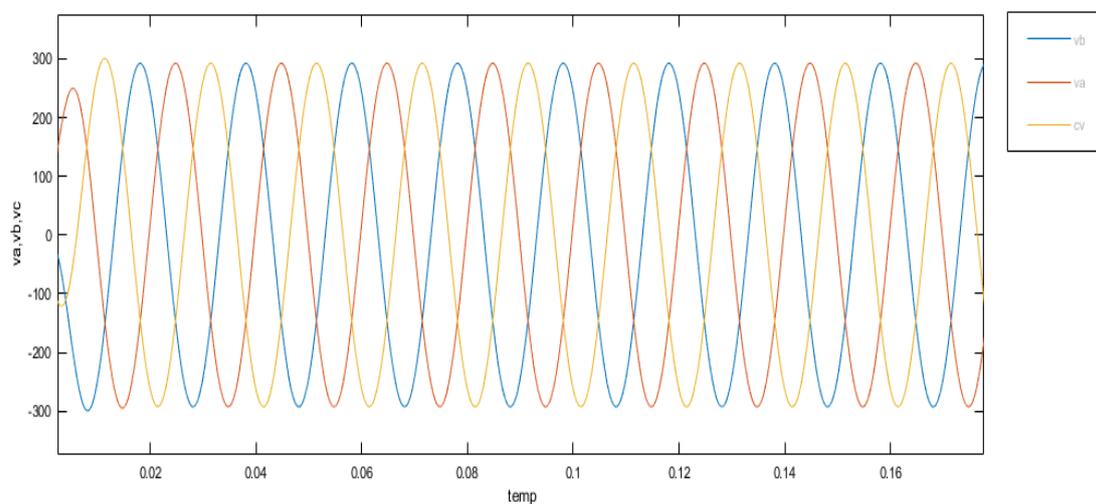


Fig III.5. Tensions statoriques Vabc à vide

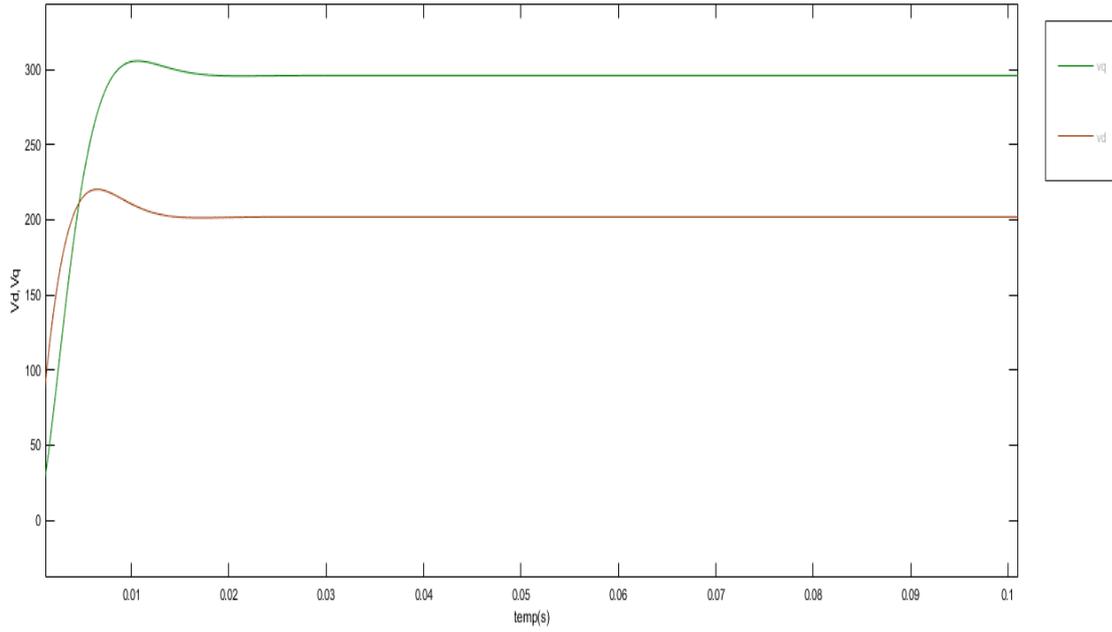


Fig III.6. Tensions dq dans le repère de Park

III.7 Fonctionnement en charge (Rch, Lch)

La génératrice alimente une charge électrique (Rch, Lch). Pour obtenir les tensions et les courants résultant de l'application de cette charge sur la génératrice [25], on applique les expressions des tensions données par :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{dI_d}{dt} + L_q \omega I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{dI_q}{dt} - L_d \omega I_d + \Phi_f \omega \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

D'autre part, l'application des tensions Vd et Vq sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = -R_{ch} I_d + L_{ch} \frac{dI_q}{dt} + L_{ch} \omega I_q \\ V_q = R_{ch} I_q + L_{ch} \frac{dI_d}{dt} + L_{ch} \omega I_d \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

En remplaçant les expressions de Vd et Vq, on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_d + \omega(L_q + L_{ch})I_q] \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_q + \omega(L_q + L_{ch})I_d + \Phi_f \omega] \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

On cherche à obtenir un système d'équation d'état :

$$\begin{cases} \dot{[X]} = [A][X] + [B][U] \\ [X] = [I_d I_q]^t, [U] = [0 \phi_f]^t \end{cases}$$

(III.37)

On peut écrire la matrice [A] comme suite :

$$[A] = [A1] + \omega [A2] \quad (\text{III.38})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

Et la matrice [B] sous la forme :

$$[B][U] = \omega \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{III.40})$$

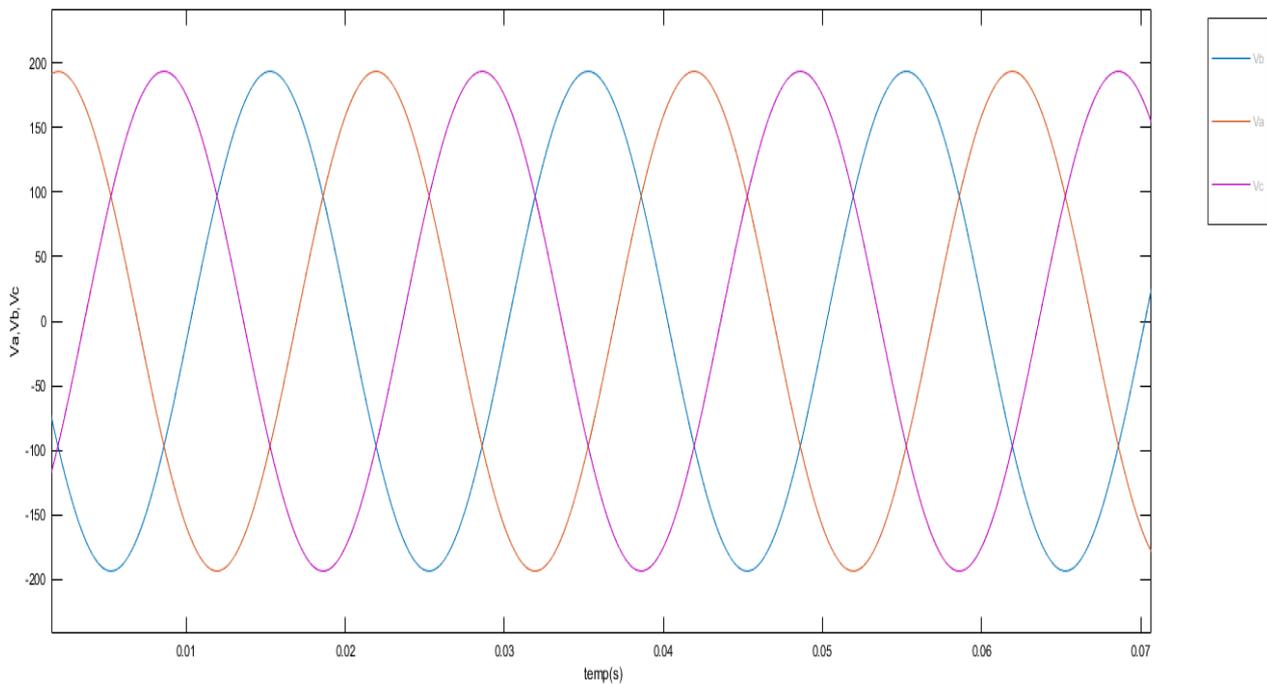


Fig. III.7. Tension statoriques Vabc en charge

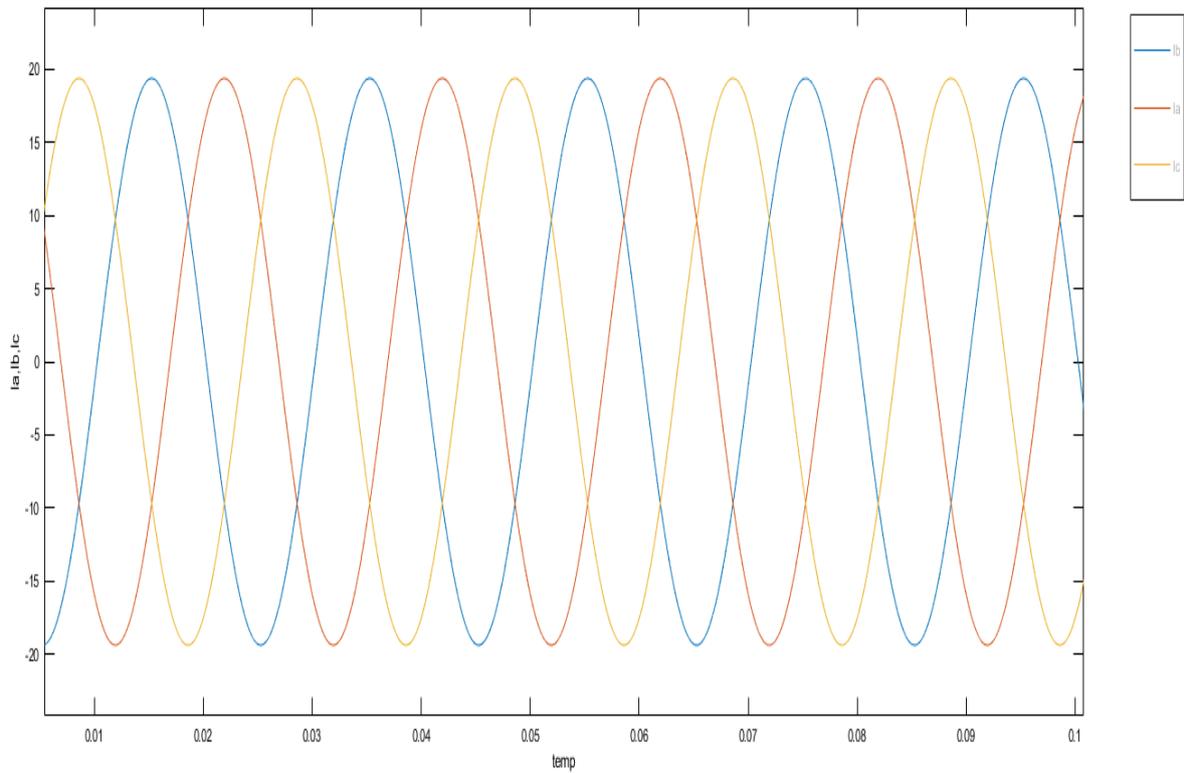


Fig. III. 8. Courants statoriques Iabc en charge

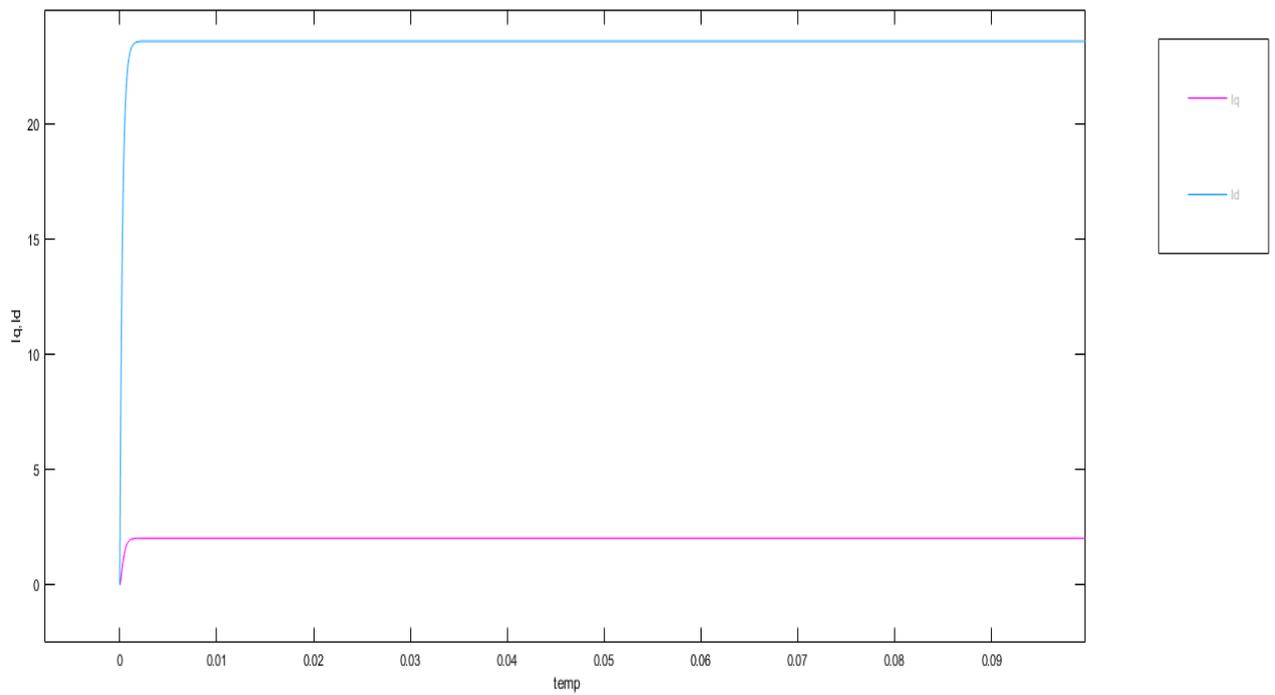


Fig III. 9. Courants dans le repère de Park dq

III.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanent tout en donnant les équations mathématiques des grandeurs électrique et mécanique de la machine. La simulation numérique des grandeurs de la machine ont été effectuées sous le logiciel Matlab/Simulink. Les résultats des simulations de la GSAP à vide et en charge sont présentés.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la modélisation du système de conversion d'énergie considéré basé sur la génératrice à aimant permanent en vue de sa commande.

CHAPITRE IV

Supervision du système étudié par Wincc

CHAPITRE IV

*Commande de la GSAP associée avec le
système éolien*

IV.1. Introduction

Le secteur de l'énergie éolienne a connu une forte croissance ces dernières années. 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. Le but de ce chapitre est d'établir un modèle analytique, puis les lois de commande de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base d'un générateur synchrone à aimant permanent afin de le connecter par la suite à un réseau électrique. Le schéma de principe de la chaîne de conversion éolienne est représenté par la figure suivante.

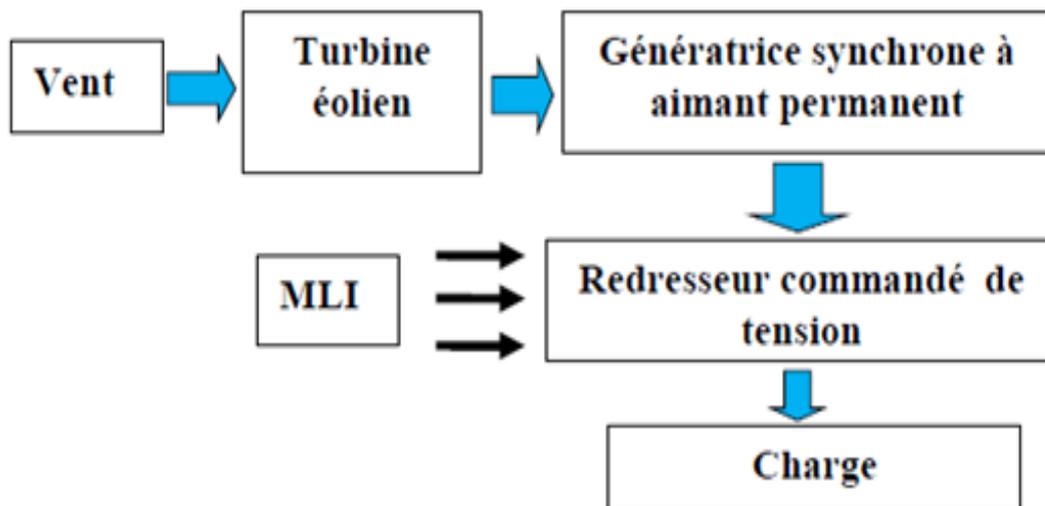


Fig. IV.1. Synoptique de la chaîne de conversion éolienne

IV. 2. Principe de la chaîne de conversion éolienne

Le système éolien étudié est un système complexe composé de plusieurs sous-systèmes appartenant à plusieurs domaines différents comme la mécanique des fluides, la mécanique traditionnelle, l'électrotechnique, et l'électronique de puissance. L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La turbine est accouplée à la génératrice et permet la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. Les composants électriques tels que: les convertisseurs statiques et l'élément de filtrage disposés en aval de la génératrice, ont un rôle

d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale. Ce niveau est aussi chargé du pilotage de l'ensemble et d'obtenir le point de fonctionnement à la puissance optimale. Le fonctionnement général est illustré par la Figure (IV.2). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques, électroniques et d'automatique

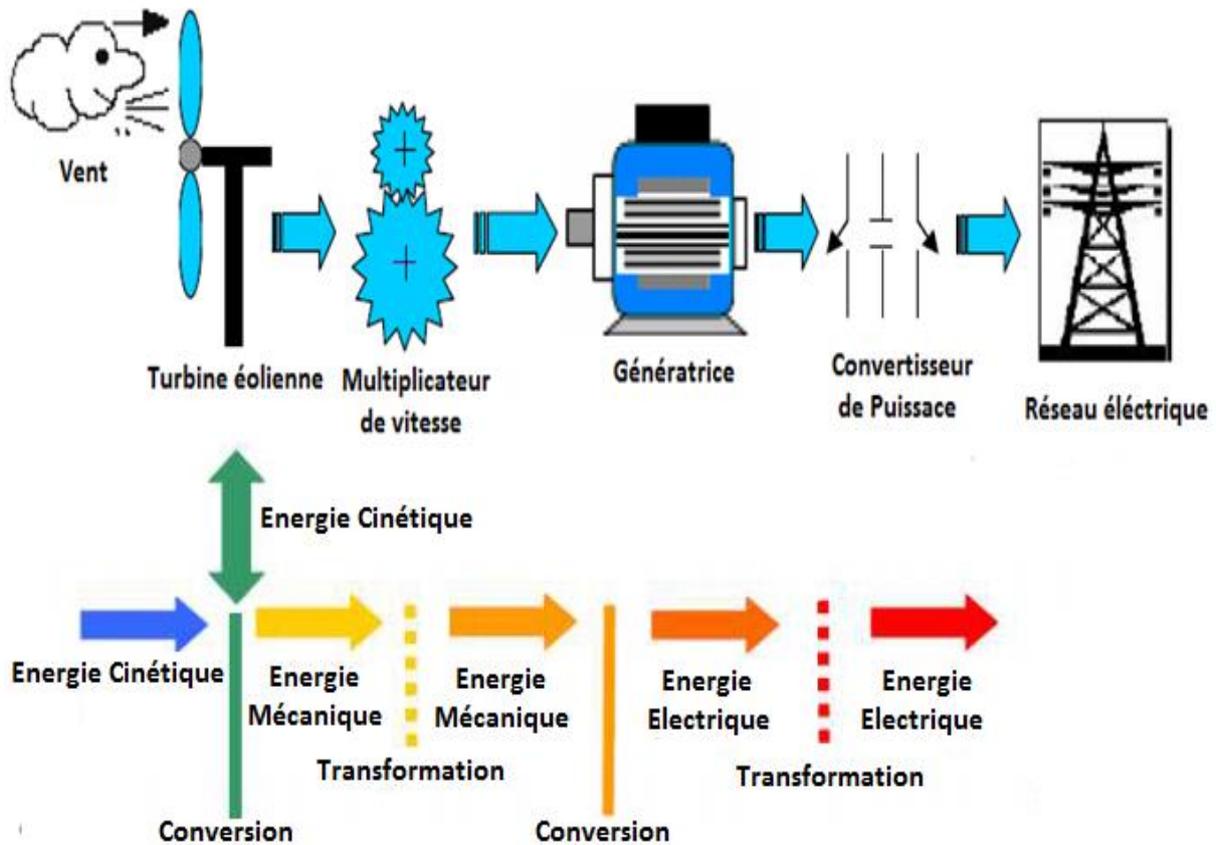


Fig. IV. 2 . Principe de la conversion d'énergie éolienne

IV. 3. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne (Figure IV. 3) est une étape primordiale pour la présentation du système considéré afin de comprendre son comportement, le principe de fonctionnement et surtout pour dimensionner de façon optimale les principaux éléments de la chaîne. Pour ce faire, la modélisation du système éolien contiendra : la modélisation aéronautique de la turbine éolienne, l'association de la turbine éolienne avec une génératrice synchrone à aimants permanents connectée à un redresseur connecté à un onduleur qui alimente à une charge toute en donnant un modèle complet de la chaîne considérée.

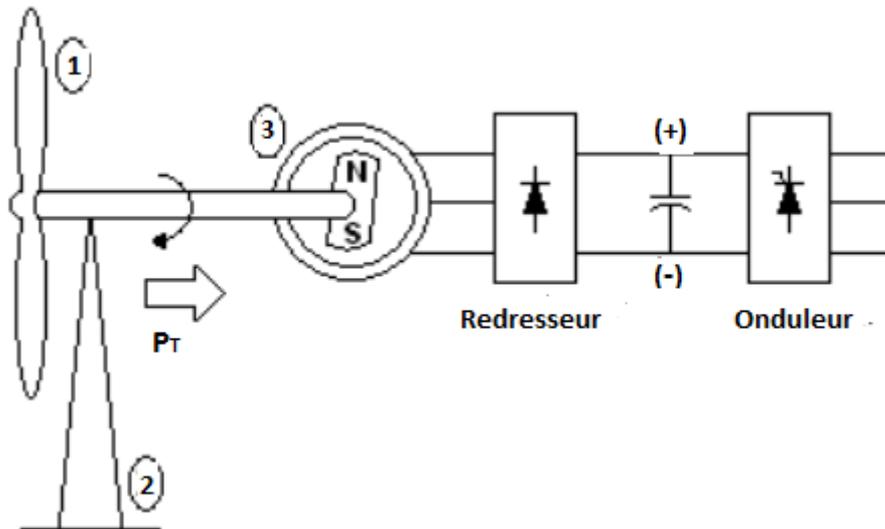


Fig. IV. 3. Chaîne de conversion éolienne à base de GSAP

(1) : Les pales ; (2) : Tour ; (3) : La génératrice

IV. 4 Générateur électrique

L'utilisation des machines électriques est indispensable dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne turbines pour la production d'électricité. Les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. Suivant les puissances et le fonctionnement désirés, la connexion au réseau électrique, le fonctionnement isolé ou autonome, plusieurs configurations peuvent être adoptées. Une éolienne est généralement munie d'un système électronique destiné à contrôler son fonctionnement général et son mécanisme d'orientation

IV.5 Les convertisseurs utilisés dans le système de conversion éolien

La plupart d'éoliennes, connectées au réseau, en fonctionnement autonome ou en fonctionnement isolé utilisent uniquement des dispositifs mécaniques pour commander la puissance électrique débitée. Ces derniers sont :

- Les servomoteurs d'orientation de la nacelle qui permettent de placer cette dernière face au vent, lors des phases de fonctionnement ;
- Le mécanisme hydraulique qui permet d'orienter les pales afin d'adopter l'angle d'incidence adéquat pour capter une puissance de vent donnée.

Aussi, pour une puissance désirée, il est possible de déterminer l'angle de calage des pales ainsi que celui que doit présenter la nacelle face au vent. Ce système présente des

inconvenients et est limité par une plage de vitesse de fonctionnement restreinte. Pour pallier à ces problèmes, on introduit des convertisseurs statiques entre la génératrice et la charge. Ces dispositifs de connexion assurent alors le réglage de la puissance, le démarrage en douceur et l'interconnexion des turbines et donnent de nouveaux degrés de liberté utilisables pour une commande adaptée afin d'améliorer le fonctionnement du dispositif.

Le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation et introduction des convertisseurs de puissance grâce à son développement rapide et aux avantages qu'il offre sur le plan capacité et qualité d'énergie. L'utilisation des convertisseurs de puissance dans le système de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée.

Plusieurs structures de conversion de l'énergie électrique fournie par la génératrice éolienne à vitesses variables peuvent être utilisées dans le but d'avoir une tension de fréquence et amplitude constants du côté réseau. Ces structures sont basées sur l'utilisations des dispositifs ou convertisseurs d'électroniques de puissance (Figure IV-4).

L'emploi de deux convertisseurs de puissance dans la chaîne de conversion éolienne permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine, par la création d'un bus continu intermédiaire. Avec cette structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée et selon la topologie des convertisseurs utilisés, on peut décrire les structures couramment utilisées dans les chaînes de conversion d'énergie dédiées aux aérogénérateurs synchrones à aimants permanents.

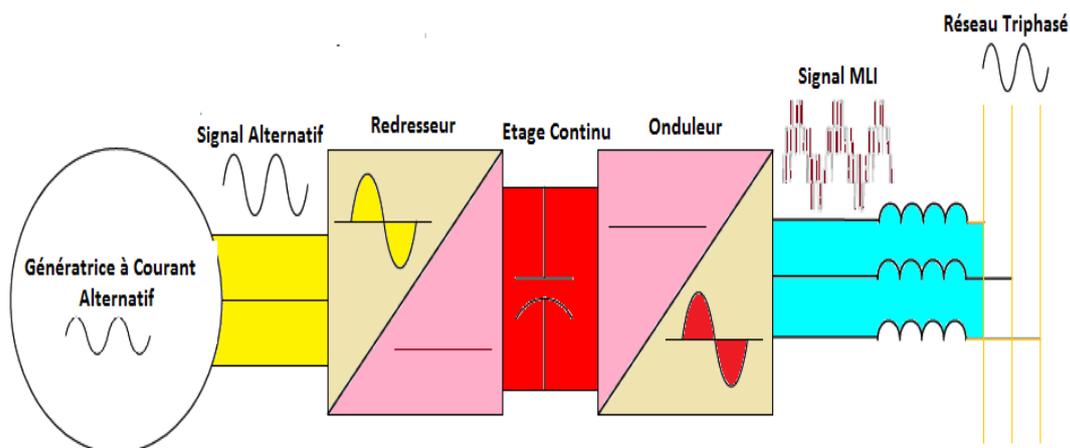


Fig IV. 4 . Convertisseurs de puissance dans la chaîne de conversion

IV. 6 Les principaux éléments du système de conversion éolienne

La configuration de base d'un système éolien connecté au réseau est composée de plusieurs composants qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique d'une manière contrôlée fiable et efficace. Le système de conversion des éoliennes comprend des composants mécaniques et électriques. Les composants électriques comprennent un générateur électrique, un convertisseur électronique de puissance, un filtre harmonique côté générateur, un filtre harmonique côté réseau un transformateur élévateur et un réseau triphasé (Figure IV.5).

Les harmoniques de commutation sont inévitables lors de l'utilisation de convertisseurs de puissance, et pour résoudre ce problème des filtres harmoniques sont utilisés dans les convertisseurs côté générateur et côté réseau. Le filtre harmonique du côté générateur contribue à réduire la distorsion harmonique des courants et des tensions du générateur.

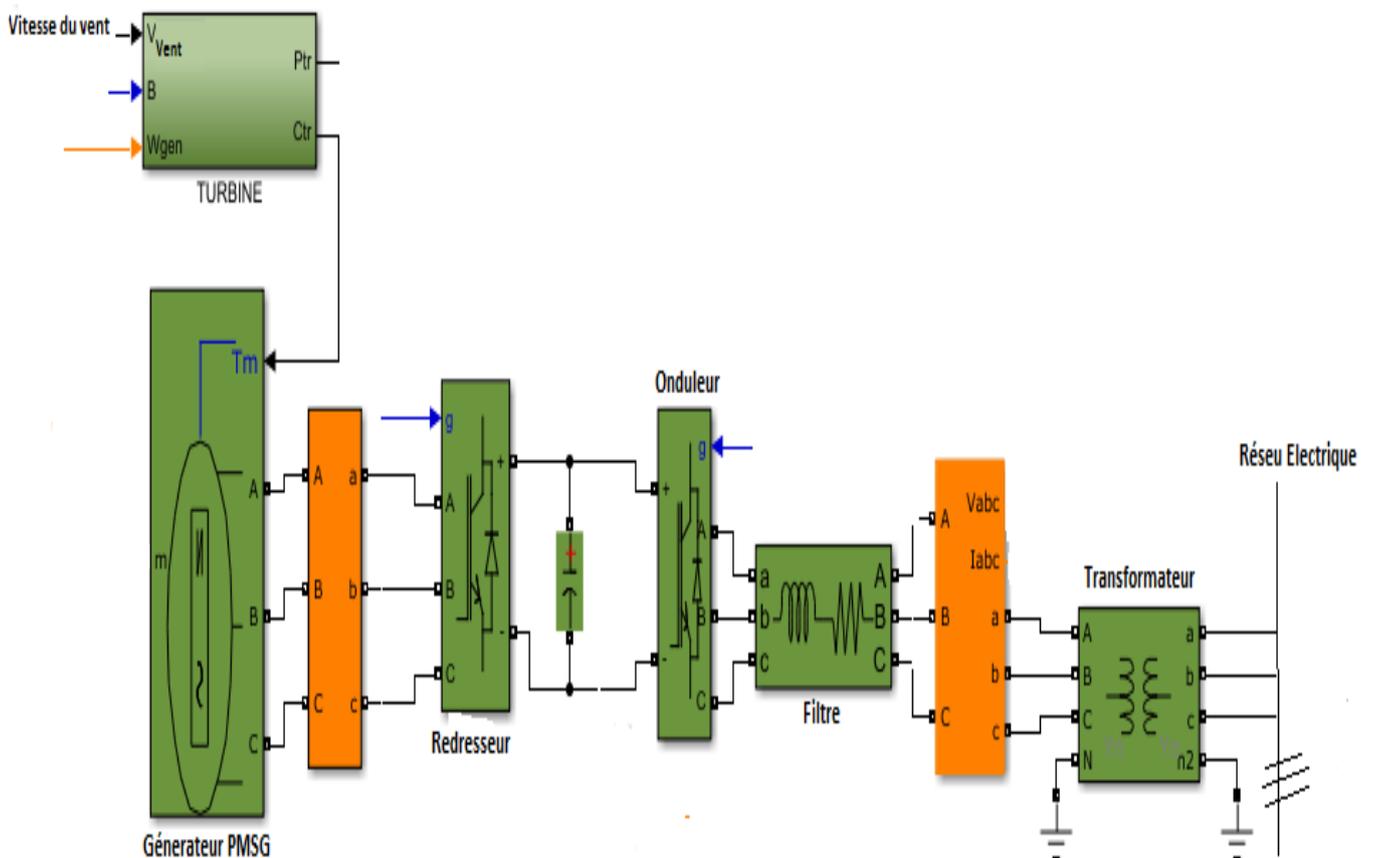


Fig. IV.5. Configuration du système éolien connecté au réseau considéré

IV. 7 Éoliennes connectées au réseau électrique

Actuellement, il existe deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques :

- Les éoliennes à vitesse fixes constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil ;
- Les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) qui sont principalement installées pour extraire la puissance du vent.

IV.7.1 Éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par l'orientation des pales (pitch contrôle), généralement ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence aux grandeurs statoriques.

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des machines asynchrones à cage d'écureuil peuvent se résumer dans les points ci-dessous :

- Système électrique simple ;
- Grande fiabilité ;
- Prix modéré.

Leurs inconvénients sont cités ci-dessous :

- Puissance extraite non optimale, ce type d'éolienne n'offre quasiment pas la possibilité de réglage de la puissance générée ;
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone.

La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

IV.7.2 Éoliennes à vitesse variable

Le système de fonctionnement à vitesse fixe peut-être bruyant à cause de la modification des caractéristiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent.

Dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance

entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette interface est constituée de deux convertisseurs, un redresseur et un onduleur connecté par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. Les avantages de cette configuration sont les suivants :

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction du couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques ;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Son principal inconvénient demeure dans l'utilisation de convertisseurs de puissances complexes.

IV.8. Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente. La modélisation du vent est primordiale afin de :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- Développer et affiner la modélisation du rotor ;
- Evaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- Fournir de l'aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques [24].

Il est donné par l'équation suivante :

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : amplitude de l'harmonique de l'ordre k

ω_k : pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

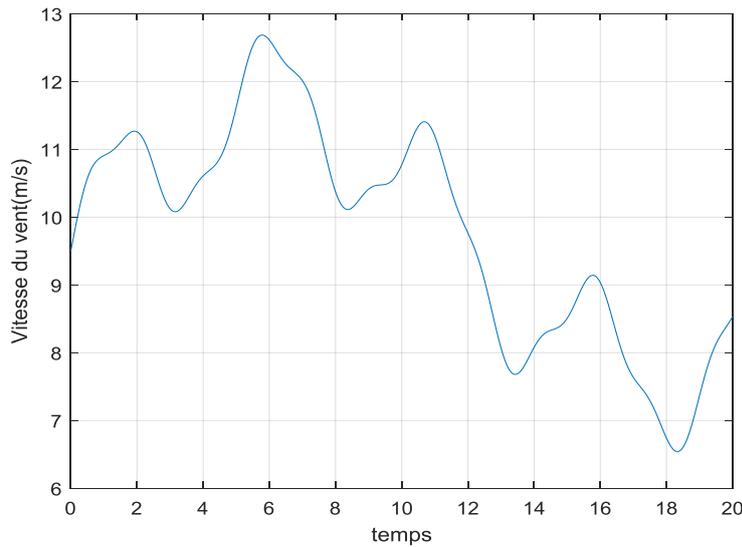


Fig IV. 6. La vitesse du vent en fonction de temps.

IV.9 Structure générale de la chaîne de conversion

La structure générale de la chaîne de conversion (Figure IV. 7) regroupe deux parties :

- Une partie qui englobe la turbine et la génératrice qui sera commandée par un convertisseur côté génératrice.
- L'autre partie concerne la connexion au réseau électrique qui se fera à travers un onduleur jouant le rôle de convertisseur côté réseau.

Cette structure nous permettra de contrôler le couple de la génératrice, de contrôler la puissance réactive et de synchroniser l'ensemble au réseau. On regroupe sous l'appellation machine synchrone, toutes les machines dont la vitesse de rotation sur l'arbre du rotor est égale à la vitesse du champ tournant. Pour obtenir un fonctionnement moteur ou générateur, le champ magnétique du rotor est généré par des aimants permanents.

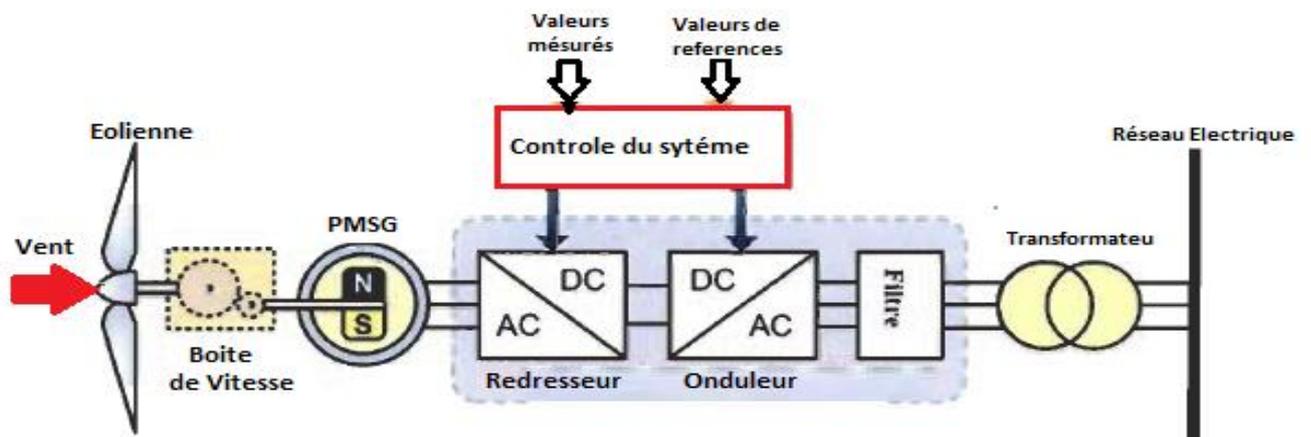


Fig. IV. 7. Structure générale de la chaîne de conversion

IV.9.1 La puissance aérodynamique

La puissance aérodynamique P_{tr} extraite par la turbine en fonction du coefficient C_p dépend de l'angle de pales β et de la vitesse λ , on a :

$$P_{tr} = \frac{1}{2} \rho S v_{vent}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (VI. 2)$$

Alors la puissance mécanique d'une éolienne peut s'exprimer en fonction de la densité de l'air, du rayon des pales R_{pale} , et de la vitesse de vent v_{vent} :

$$P_m = C_p \lambda \pi R_{pale}^2 v_{vent}^3 \quad (VI. 3)$$

IV.9.2 Schéma bloc du modèle de la turbine

Le schéma correspondant à la modélisation de la turbine est donné par la figure suivante :

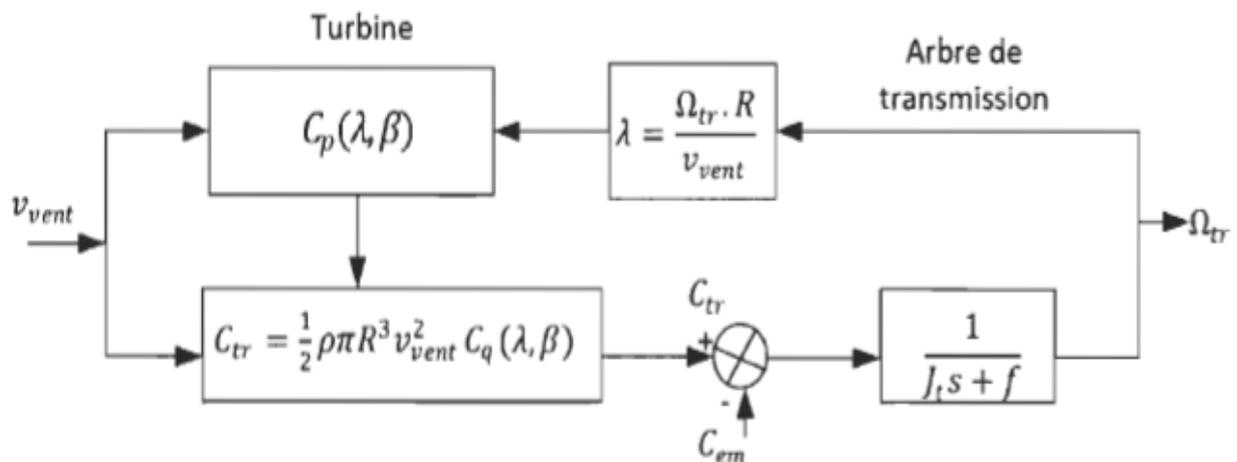


Fig. IV.8. Schéma bloc du modèle de la turbine

La turbine génère le couple aérodynamique qui sera appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont :

- La vitesse du vent ;
- L'angle d'orientation des pales ;
- La vitesse de rotation de la turbine ;

IV.9.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne

Il y a trois zones de fonctionnement pour une éolienne

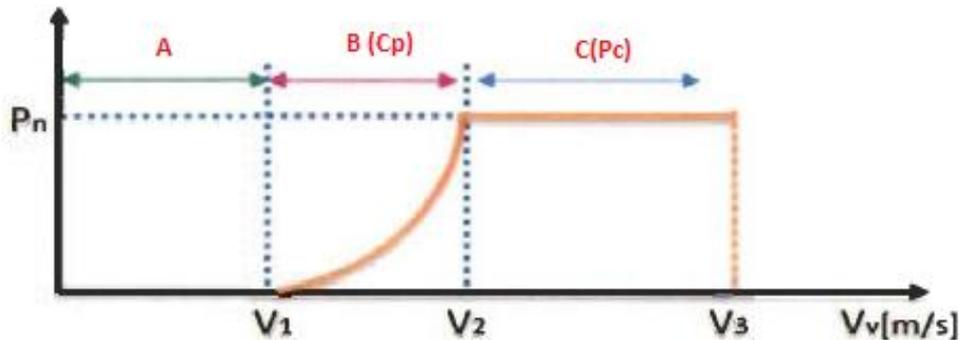


Fig. IV.9. Zone de fonctionnement d'une éolienne

- V_1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine, cette vitesse est variable selon les constructeurs et la puissance des éoliennes. Entre 2,5 m/s et 4 m/s pour les éoliennes de forte puissance.
- V_2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice synchrone. Suivant les constructeurs V_2 varie entre 11,5 m/s et 15 m/s en fonction des technologies.
- V_3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pâles. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25 m/s.

▪ **Zone I : $V_v < V_1$**

La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner, mais l'énergie captée est trop faible.

▪ **Zone II : $V_v < V_2$**

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite, appelées généralement MPPT. Cette zone correspond au fonctionnement dit à charge partielle (CP).

▪ **Zone III : $V_2 < V_v < V_3$**

La puissance incidente devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée tout en restant le plus proche possible de P_n cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

▪ **Zone IV : $V_v > V_3$**

La vitesse du vent devient trop forte, la turbine est donc arrêtée et la puissance extraite est nulle.

Deux stratégies de commande de la turbine à vitesses variables sont indiquées sur la figure (IV.7)

- Stratégie d'optimisation de puissance : Dans cette stratégie représentée par les Zones 1 et 2 l'énergie capturée est optimisée au-dessous de la vitesse nominale du vent.
- Stratégie de limitation de puissance : Le but de cette stratégie est de limiter la puissance nominale de la turbine pour une vitesse supérieure à vitesse nominale du vent « la zone 3 ».

Cette caractéristique, idéale, montre trois zones différentes avec des objectifs de commande distinctifs.

IV.10 Système de contrôle de l'aérogénérateur

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées :

1. Boucle de régulation de vitesse.
2. Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la stratégie d'optimisation de la puissance où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique. Dans la stratégie de limitation de puissance, les deux boucles de régulation interviennent.

Quand la vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale, tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lors d'une rafale de vent, la vitesse de rotation va augmenter et peut dépasser la vitesse nominale à cause de la vitesse lente du système d'orientation des pales qui a une dynamique plus lente que celle de la machine. Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice, et anticipe l'action du dispositif d'orientation des pales en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation dans la zone 3.

IV.11 Régulation de vitesse

L'une des méthodes pour extraire le maximum de puissance de la turbine consiste à imposer un couple optimal sur la génératrice. Selon l'équation fondamentale de la dynamique entre la turbine et la génératrice synchrone, permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut réguler cette vitesse en utilisant un asservissement adéquat. On doit générer un couple électromagnétique de référence.

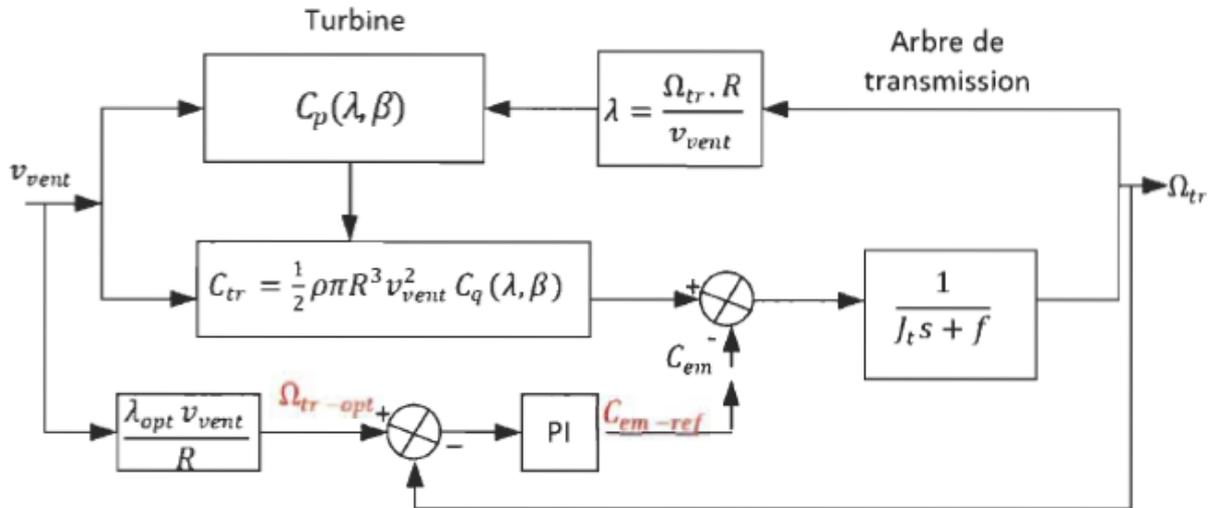


Fig. IV. 10. Boucle de régulation de la vitesse de rotation

IV.12 Régulateur de l'angle de calage

Les turbines éoliennes de grande puissance, de nos jours utilisent le système PITCH pour le contrôle de la puissance dans la zone 3. Elles utilisent le principe du contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à sa valeur nominale.

Ainsi, l'orientation des pales pour augmenter ou diminuer la portance selon la vitesse du vent constitue l'organe principal du contrôle de la puissance extraite de la turbine. En réglant l'angle d'orientation des pales, et on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. La figure VI. 9 montre le principe du control de l'angle de calage.

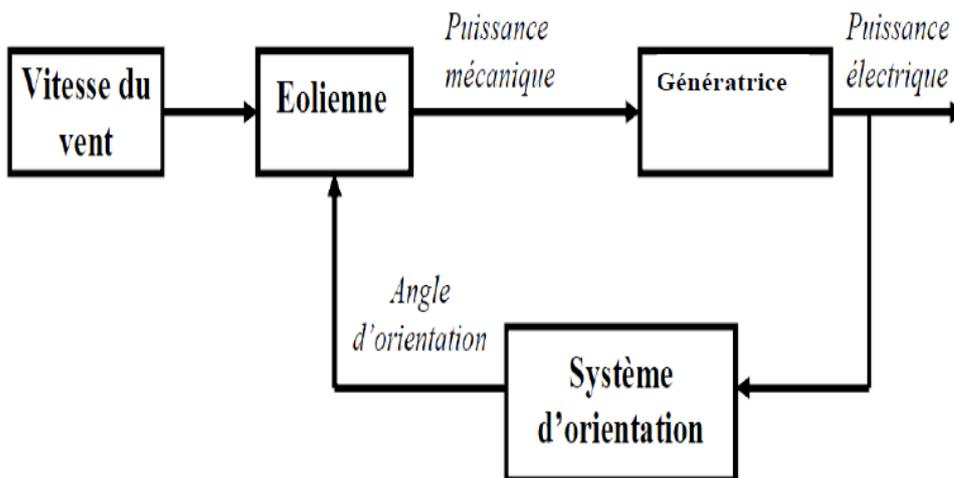


Fig. IV.11. Principe du contrôle de l'angle de calage

Lorsque que la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, la puissance que la turbine peut extraire du vent est supérieure à la valeur nominale de la génératrice, cette puissance peut être limitée par l'angle de calage des pales de la turbine (pitch control). Le calcul des différents paramètres de régulation pour l'asservissement de l'angle de calage dépend de plusieurs conditions. Nous avons dans ce travail réalisé la modélisation du système de régulation de calage à partir des boucles de régulation déjà développées [25].

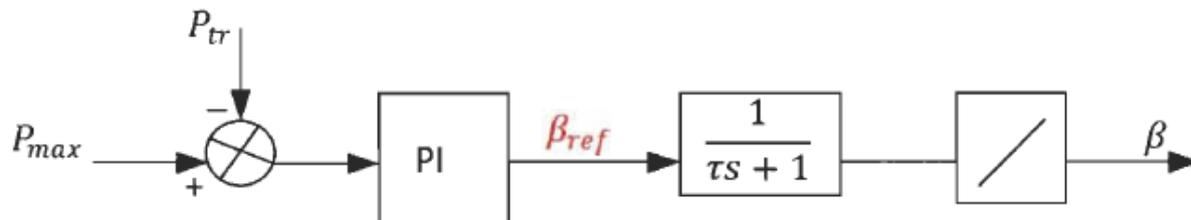


Fig. IV. 12. Gestion de l'angle de calage (pleine charge)

IV.13 Contrôle de puissance par action mécanique

IV.13.1 Contrôle de puissance par action mécanique

Les phénomènes de décrochage (stall) et calage (pitch), prennent lieu lorsqu'on modifie l'angle d'incidence du vent par rapport à la position de la pale. Ces deux phénomènes permettent de modifier la force de portance qui induit la rotation des pales de la turbine éolienne. Ainsi on peut changer la puissance mécanique récoltée de la puissance cinétique du vent et par la suite régler la puissance électrique générée. Ce changement d'angle de décrochage ou plus souvent d'angle de calage ; puisque c'est la méthode la plus utilisée dans l'industrie éolienne, peut se traduire en terme mathématique par une modification de la valeur du coefficient de puissance C_p .

Il est important d'extraire le maximum de puissance et de limiter la puissance mécanique extraite pour les grandes vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale de l'éolienne. La limitation de la puissance peut être réalisée avec trois méthodes :

- Contrôle du décrochage : c'est le contrôle présenté dans les chapitres précédents, il présente toutefois l'inconvénient de voir la puissance mécanique légèrement supérieure à celle préconisée pour la génératrice. La puissance mécanique diminue pour les grandes vitesses de vent.
- Contrôle actif du décrochage : basé sur le même principe que le dernier, ce type de contrôle élimine l'inconvénient présent dans le contrôle précédent.
- Contrôle de calage : ce type de contrôle se base sur la modification de l'angle de calage pour diminuer la puissance extraite du vent d'une manière lisse

Une fois ces contrôles sont poussés à leurs limites pour les rafales de vent, à vitesse supérieure à la vitesse de déclenchement (Cut-out speed), il est important de protéger la structure mécanique contre les conséquences, en positionnant l'angle des pales, en tournant la nacelle selon l'axe vertical via le système d'orientation (Yaw system en anglais) de manière à positionner le plan de rotation des pales dans le sens du vent. On peut aussi avoir recours à des freins mécaniques.

Ces contrôles mécaniques sont présents uniquement dans les applications à grande échelle telle que dans les rotors présents dans les fermes éoliennes. Pour les applications de petite puissance, ce type de contrôle est quasiment absent, vu que cela induit des coûts supplémentaires, et qu'il est possible de substituer ces contrôles mécaniques par des contrôles électriques qui allège le coût de l'installation.

IV.13.2 Contrôle de puissance par action électrique

Le contrôle de la puissance par action électrique se fait en agissant sur la commande des interrupteurs de puissance de manière à régler les paramètres électriques en sortie de l'alternateur affectant la vitesse du rotor. La commande des circuits de l'électronique de puissance est gérée au moyen d'algorithmes qui cherchent constamment le point de fonctionnement permettant l'extraction de la puissance maximale. Ces algorithmes sont appelés algorithme de recherche de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

Ce type de contrôle est utilisé conjointement avec le contrôle mécanique pour les éoliennes de grande échelle. Il est caractérisé par un temps de réponse rapide. Pour les applications de petites puissances caractérisées par des éoliennes de calage fixe, le contrôle de la puissance MPPT est entièrement géré par la commande des dispositifs électriques.

Plusieurs approximations numériques ont été développées dans la littérature pour déterminer une expression du coefficient C_p .

✚ Première expression

$$C_p = \frac{1}{2}(\gamma - 0,022\beta^2 - 5,6)e^{-0,17\gamma} \quad (\text{IV.4})$$

Où :

$$\gamma = \frac{9V_w}{4\Omega} \quad , \quad \gamma \text{ est le rapport de vitesse périphérique et } \beta \text{ représente l'angle}$$

d'attaque de la pale en degré.

✚ Deuxième expression

$$C_p = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda} - 0,58\beta - 0,002\beta^{2,14} - 13,2 \right) e^{-\frac{18,5}{\lambda}} \quad (\text{IV. 5})$$

✚ Troisième expression

$$C_p = (0,44 - 0,0167\beta) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0,3\beta} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3)\beta \quad (\text{IV. 6})$$

✚ Quatrième expression

$$C_p = 0,5176 \left(\frac{116}{\lambda} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda}} + 0,0068 \cdot \lambda \quad (\text{IV. 7})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$$

Cette dernière expression fait partie de la bibliothèque de SIMULINK, et donc sera celle utilisée pour valider le modèle notre système éolien. La courbe de cette dernière formule est donnée par la Figure IV.11. Plusieurs courbes sont représentées sur cette figure dépendant de l'angle d'attaque β , mais dans ce mémoire nous serons intéressés uniquement par celle correspondant à $\beta=0$. Cela est dû au fait que sur une petite éolienne il n'existe pas de moyen de changer l'angle de calage des pales car cela revient à produire une éolienne plus cher.

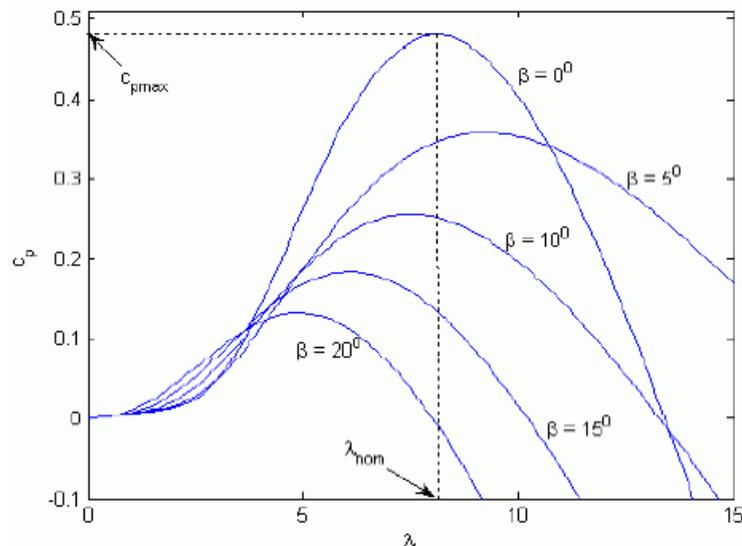


Fig. IV.13. Courbe Cp du modèle de Simulink

L'expression du couple correspondant à la puissance précédemment mentionnée est donnée par :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda) \rho S V_w^2}{\Omega} \quad (\text{IV. 8})$$

Le couple mécanique vu par la machine synchrone est différent du couple éolien car il faut tenir compte de l'inertie de l'éolienne et des frottements visqueux propre à la structure de l'éolienne. Ceci peut être traduit en terme mathématiques par l'équation suivante :

$$C_{eol} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_{mec} \tag{IV.9}$$

Avec J et f respectivement l'inertie de l'éolienne et le frottement de l'éolienne. Et p étant l'opérateur laplacien . A partir de ces deux équations,nous pouvons représenter le modèle dynamique de l'éolienne avec le schéma suivante :

$$\Omega = \frac{1}{(f+pJ)} (C_{eol} - C_{mec}) \tag{IV.10}$$

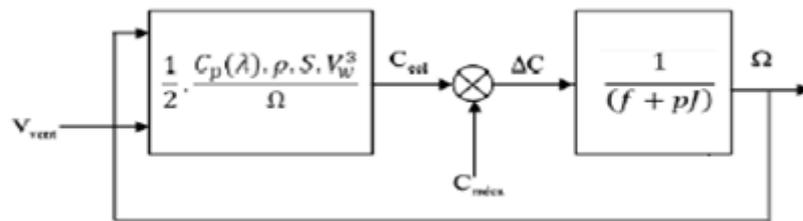


Fig.IV.14. Modèle dynamique de l' éolienne

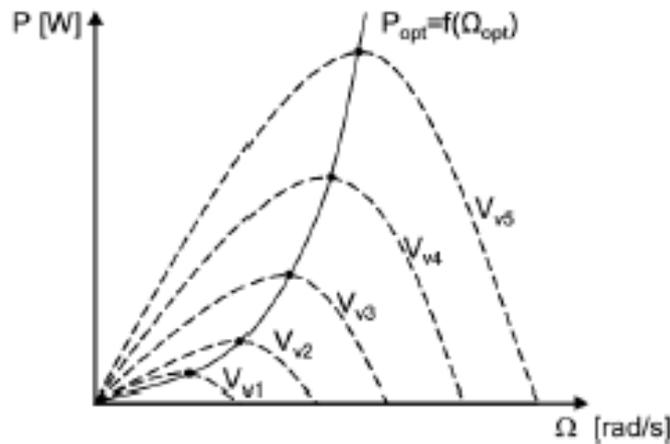


Fig. IV.15. Courbe de puissance d'une éolienne pour différentes vitesses de vent

IV.14 Stratégie MPPT avec connaissance de courbe caractéristique

Ces stratégie de commande souvent intitulées contrôle basé sur la relation optimale, *ORB* (Optimum Relationship- Base Control), se servent de la caractéristique de l'éolienne $C_p(\lambda)$ afin de déterminer la vitesse spécifique optimale qui permette de dresser la relation optimale entre puissance maximale et vitesse de rotation du rotor optimale et ce pour retrouver rapidement la consigne à appliquer au régulateur pour traquer en permanence et efficacement la puissance maximale.

IV.14.1 Commande en vitesse

La figure VI.11 présente les allures de la courbe $C_p(\lambda)$ de différents types d'éoliennes. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale << extractible >> donc au point optimale. Il est caractérisé par la vitesse spécifique optimale λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale $C_{p_{opt}}$.

La vitesse spécifique est définie comme étant :

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{V_w}$$

Nous pouvons en extraire l'expression de la vitesse du vent :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega^3 \quad (IV.11)$$

Nous remplaçons cette expression dans la puissance extraire de l'éolienne :

$$V_w = \frac{\Omega \cdot R}{\lambda}$$

Cette équation permet de tracer la famille des courbe de la figure IV.16. La puissance éolienne à une vitesse de vent donnée est donc liée à la vitesse de rotation imposée par la charge mécanique. Une régulation en vitesse du système permettant de contrôler la puissance éolienne peut donc être utilisée. Il reste à définir la consigne de vitesse selon une fonction MPPT pour compléter l'algorithme de pilotage.

Nous supposons maintenant que le point optimale est atteint (c'est-à-dire la paire $(\lambda_{opt}, C_{p_{opt}})$ est atteinte). En réarrangeant l'équation précédente, le calcul de la vitesse optimale est possible à partir de la valeur de la puissance maximale :

$$\Omega_{opt} = \sqrt[3]{\frac{P_{opt}}{K_{opt}}} \quad (IV.12)$$

Avec :

$$\mathbf{K}_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt}) \rho \cdot R \cdot S}{\lambda_{opt}^3} \quad (\text{IV.13})$$

A partir de ces équations, il est possible de traquer le point de fonctionnement optimal correspondant à la puissance maximale. [25]

A l'aide d'une simple mesure de puissance électrique, la vitesse de référence peut être calculée selon le schéma de la figure IV.16



Fig. IV.16: vitesse de référence en fonction de la puissance

La convergence de la recherche de point maximale de puissance est illustrée selon la figure IV.17

- En mesurant la puissance P_1 à la vitesse de rotation Ω_1 , la vitesse de référence est calculée selon l'équation trouvée précédemment. Ce qui équivaut à trouver une vitesse $\Omega_{ref} = \Omega_2$ correspondant au point $(\Omega_2 ; P_1)$ de la courbe optimale $P_{opt} = f(\Omega_{opt})$
- Après une période de calcul, l'état du système équivalent à $(\Omega_2 ; P_2)$ est atteint et la vitesse de référence Ω_3 est calculée.
- Après plusieurs itérations, selon la valeur de l'inertie et de la bande passante du régulateur de vitesse, le point optimal (Ω_{opt}, P_{opt}) est atteint.

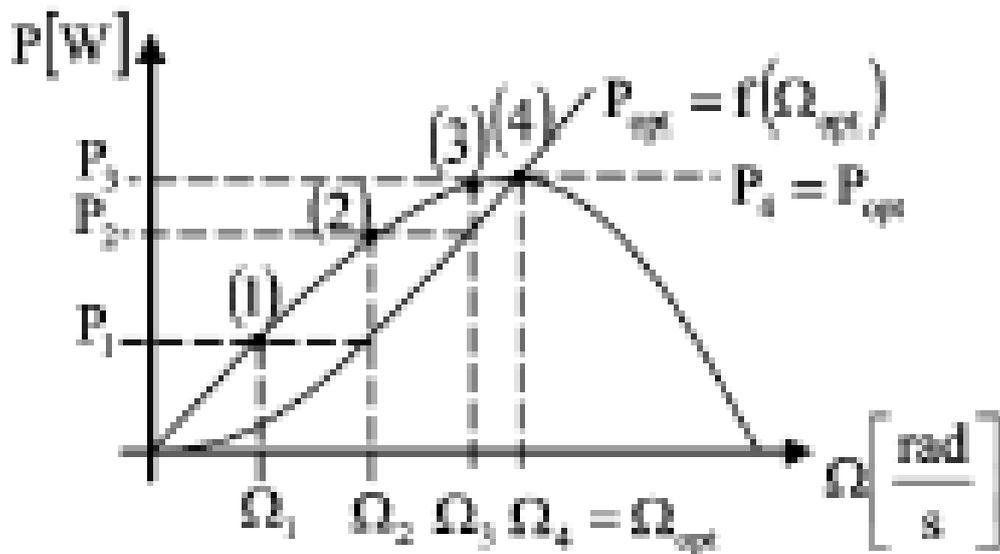


Fig. IV.17. Convergence vers le point maximum via contrôle de la vitesse [25]

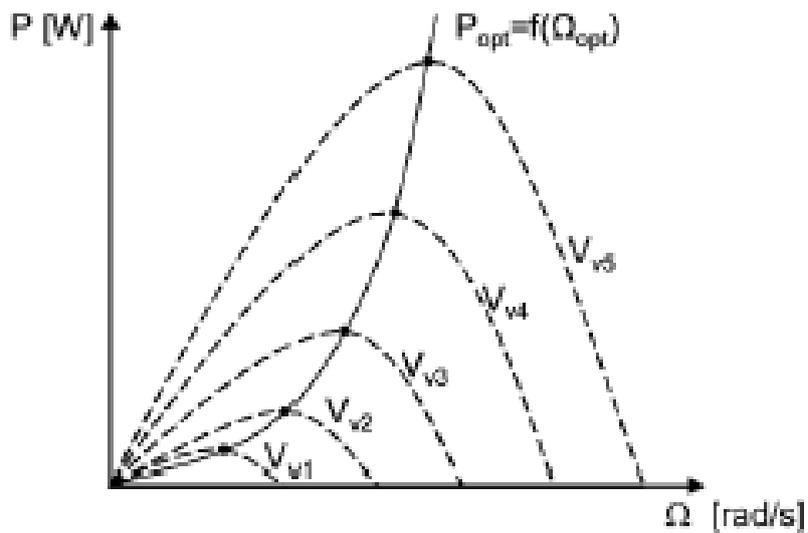


Fig. IV.18. Convergence vers le point maximum via contrôle de la vitesse du vent [25]

IV.14.2. Commande en couple

Compte tenu de la relative difficulté à régler la vitesse d'une turbine fortement inertielle, une commande en couple de la génératrice peut être envisagée. Cette façon de procéder donne une association plus « saine » de point de vue physique : une source de vitesse (ensemble éolienne) est connectée à une source de couple (génératrice pilotée en couple). Cette nouvelle façon de contrôler le système demande une adaptation du dispositif de recherche du point de puissance maximale MPPT.

En utilisant la formule du calcul de la puissance retrouvé précédemment, il est facile de déterminer le couple éolien correspondant :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot R^3}{\lambda^3} \Omega^3 = C_{eol} \Omega \tag{IV.14}$$

Alors le couple éolien est proportionnel au carré de la puissance retrouvé précédemment, il est facile de déterminer le couple éolien correspondant :

$$C_{eol} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega^3 \tag{IV.15}$$

En se plaçant dans les conditions d'exploitation optimale de l'éolienne, c'est-à-dire à $\lambda = \lambda_{opt}$. Le rapport en vitesse angulaire et couple pour avoir le maximum de la puissance est donné par la relation :

$$C_{eol}^{opt} = K_{opt} \cdot \Omega_{opt}^2 \tag{IV.16}$$

Avec K_{opt} le même rapport défini dans le cas de la régulation en vitesse

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_p(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot R^3}{\lambda_{opt}^3} \tag{IV.17}$$

Selon des études expérimentales, la famille de courbe de couple par rapport à la vitesse de vent pour différentes vitesses est donnée par la courbe gauche de la figure IV.19

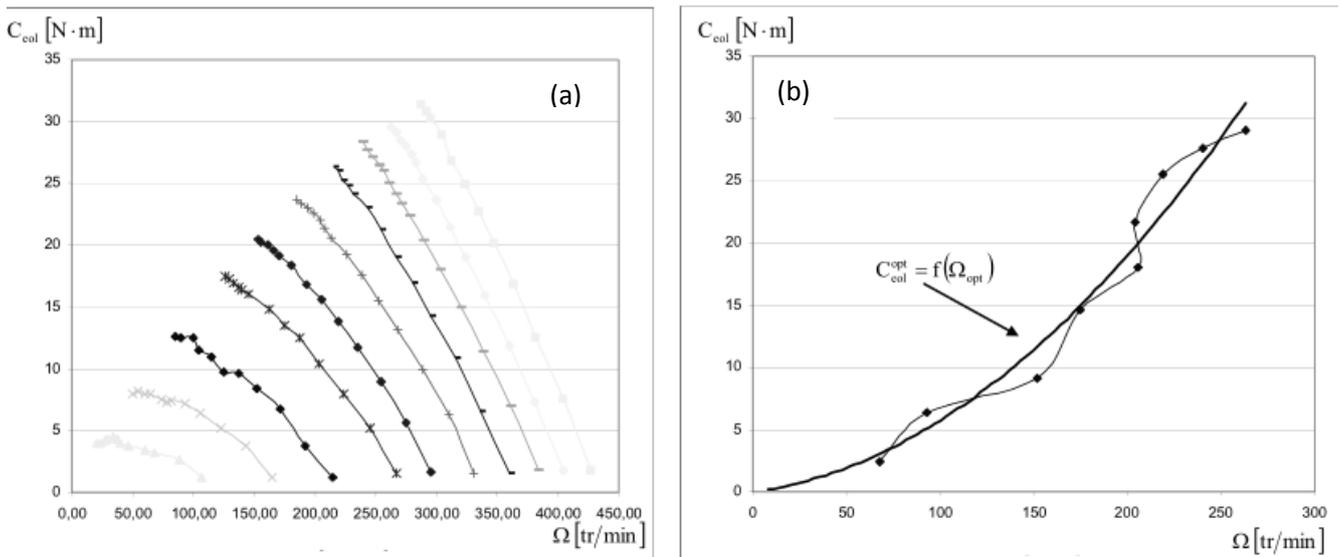


Fig. IV.19. (a).Famille de courbe du couple pour différentes vitesse du vent.
(b).Courbe du couple maximal [25]

Contrairement à l'algorithme MPPT de la commande de vitesse, qui se sert de la mesure du courant et de la tension pour déterminer la puissance actuelle, et l'utilise pour déterminer la nouvelle consigne de vitesse, l'algorithme de commande en couple nécessite comme entrée une mesure de la vitesse angulaire du rotor pour déduire via le rapport K_{opt} la nouvelle consigne de couple. Toutefois pour les applications de petites puissances ayant une contrainte d'économie, il est préférable de faire une déduction de la vitesse du rotor à partir de la mesure de tension aux bornes de l'alternateur.

IV.15. Générateur éolien

Dans cette étude, nous avons utilisé la génératrice synchrone à aimant permanent de puissance 5 GW connectée au réseau moyen tension pour une vitesse du vent donné par le profil du vent considéré et qui a les caractéristiques électriques et les paramètres sont donnés par le figure IV.19 et IV.20 suivantes :

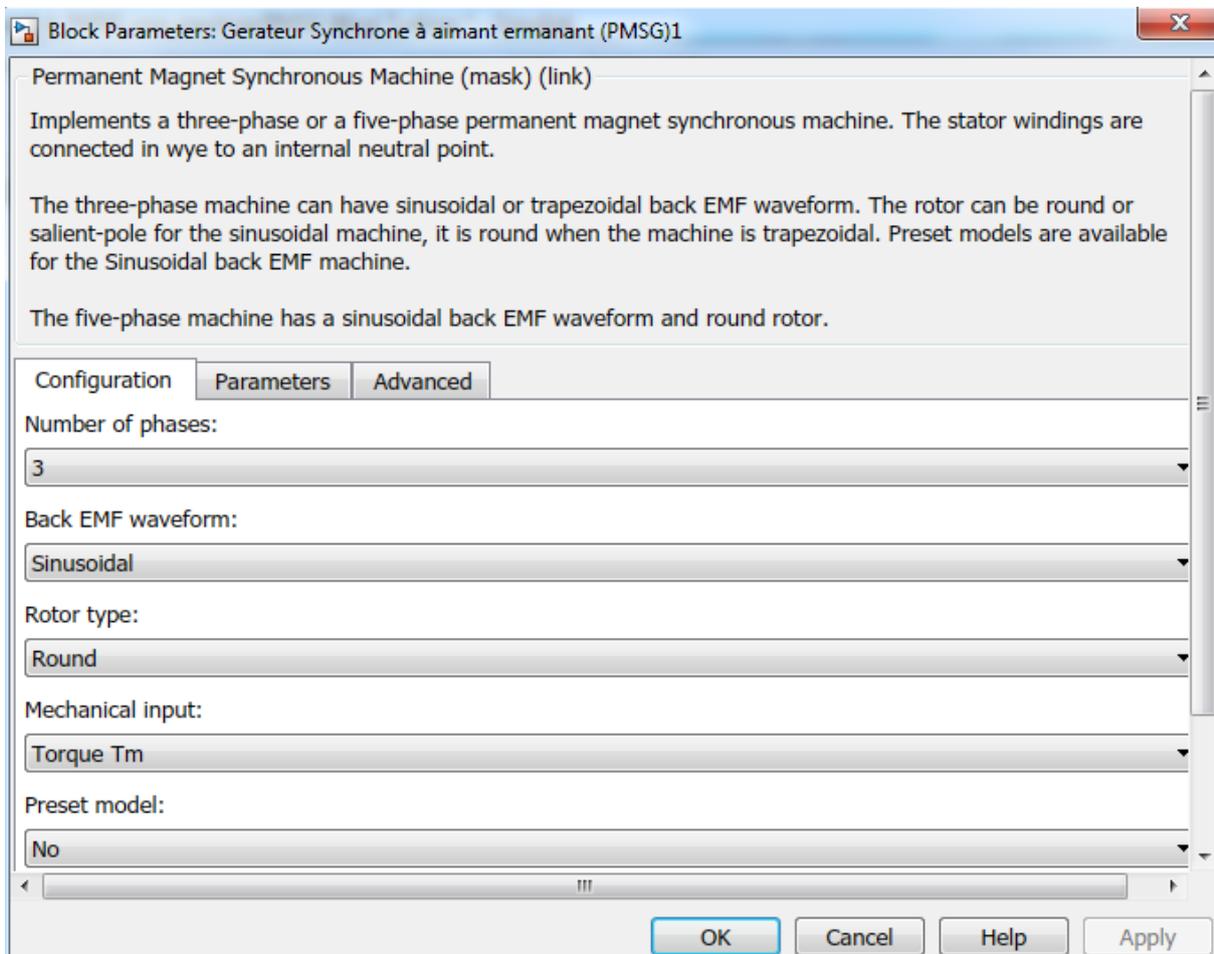


Fig IV.20. Caractéristiques de la PMSG considéré

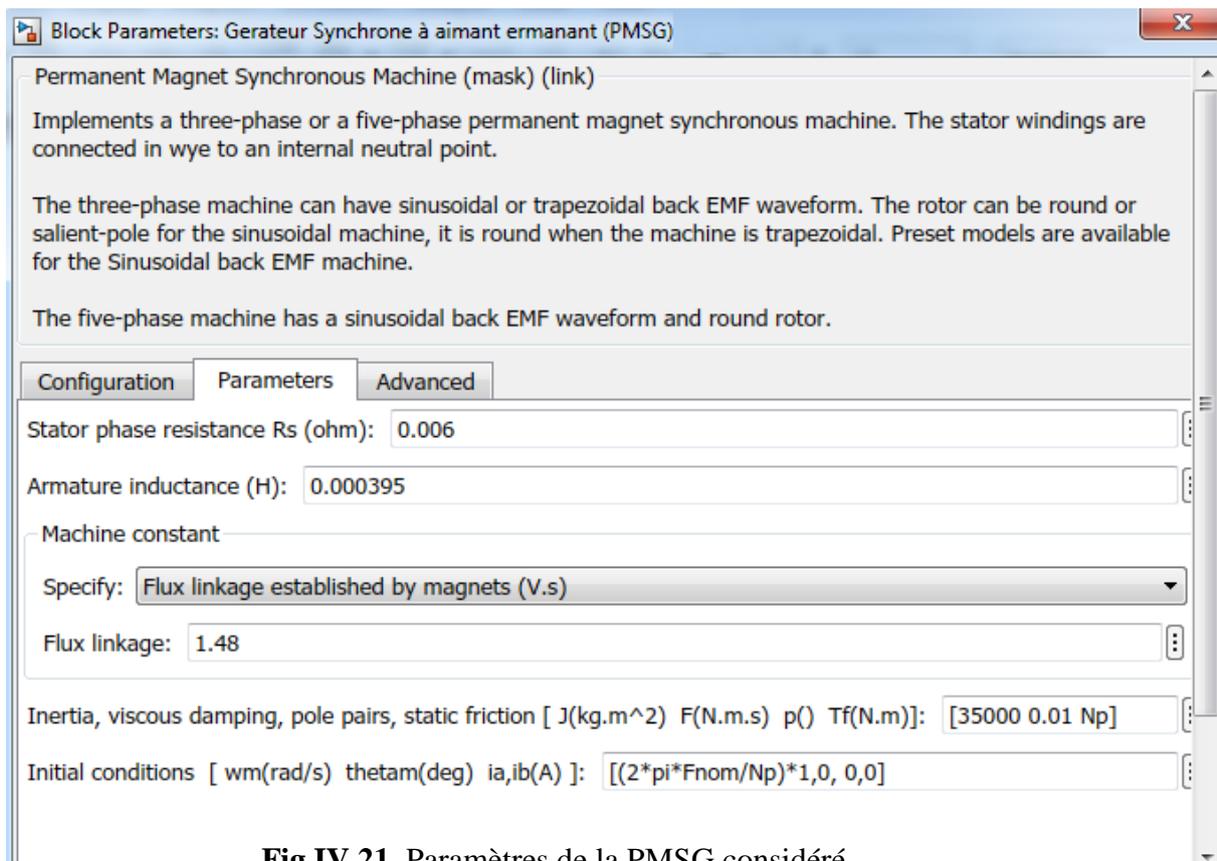


Fig.IV.21. Paramètres de la PMSG considéré

IV.16 Simulation et caractéristique de la conversion éolienne étudiée

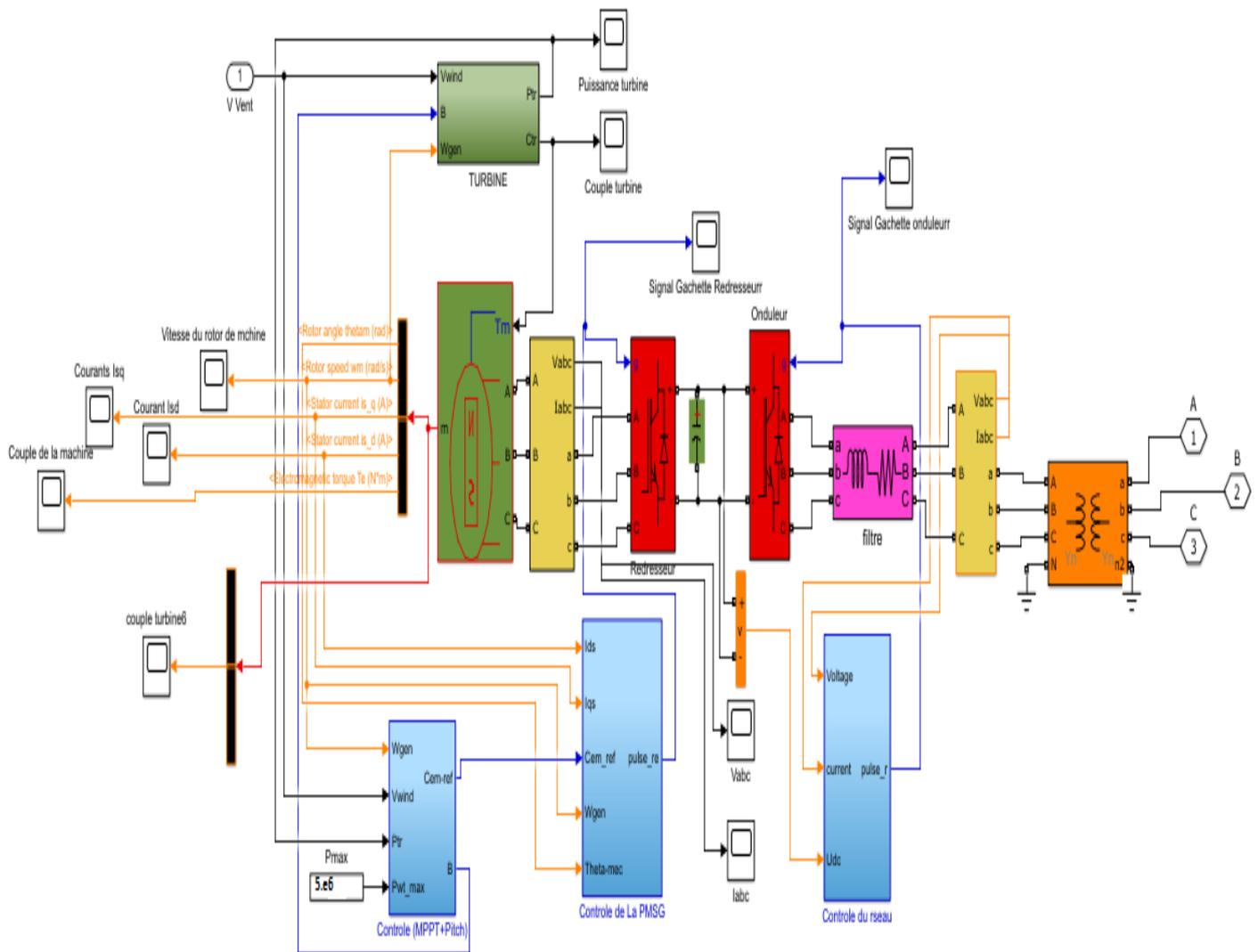


Fig IV. 22. Structure de simulation et de commande de l'ensemble (Turbine et génératrice)

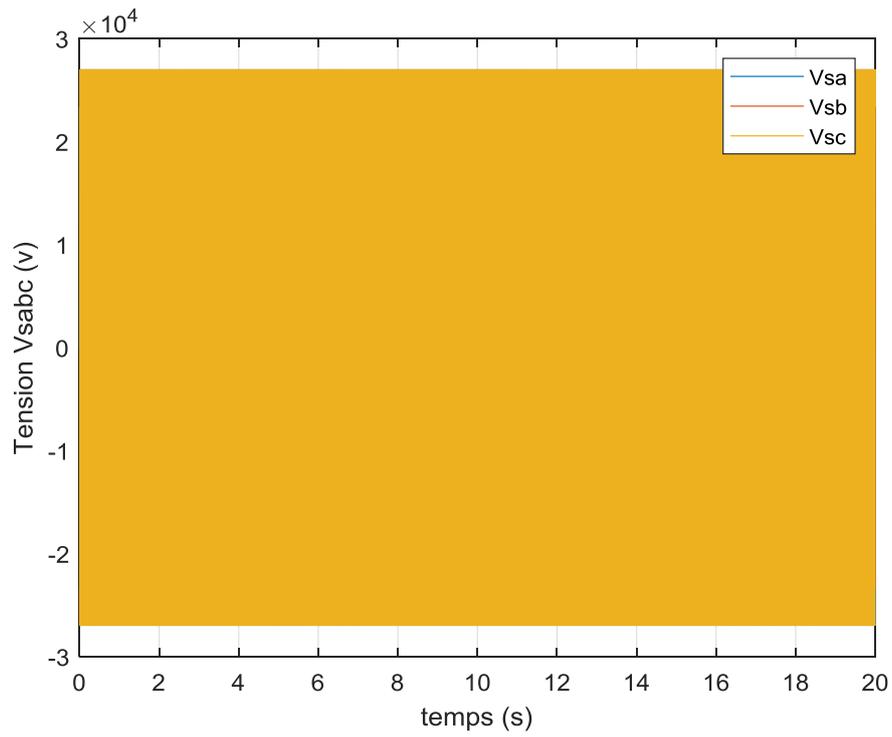


Fig. IV.23. Tensions triphasés

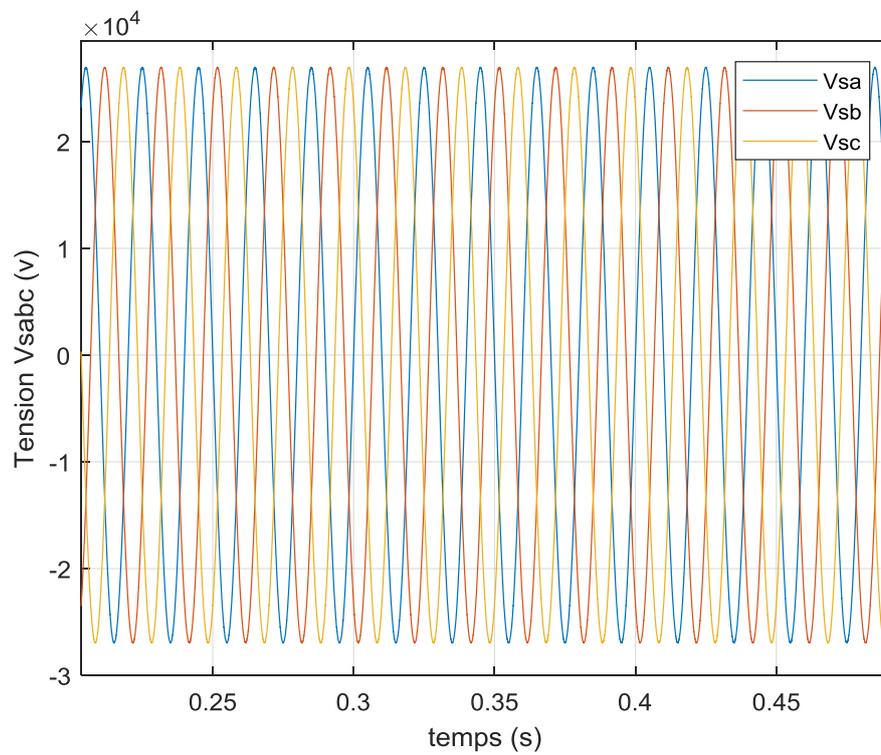


Fig. IV. 24. Zoom de tensions triphasées

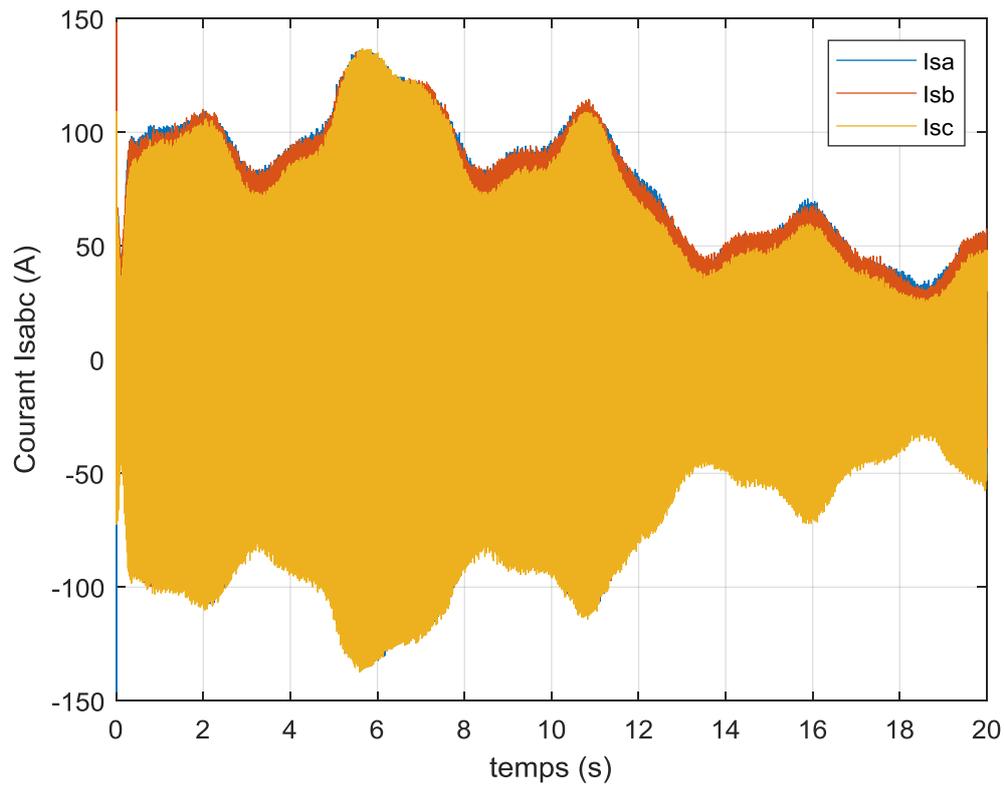


Fig. IV. 25. Courants triphasés

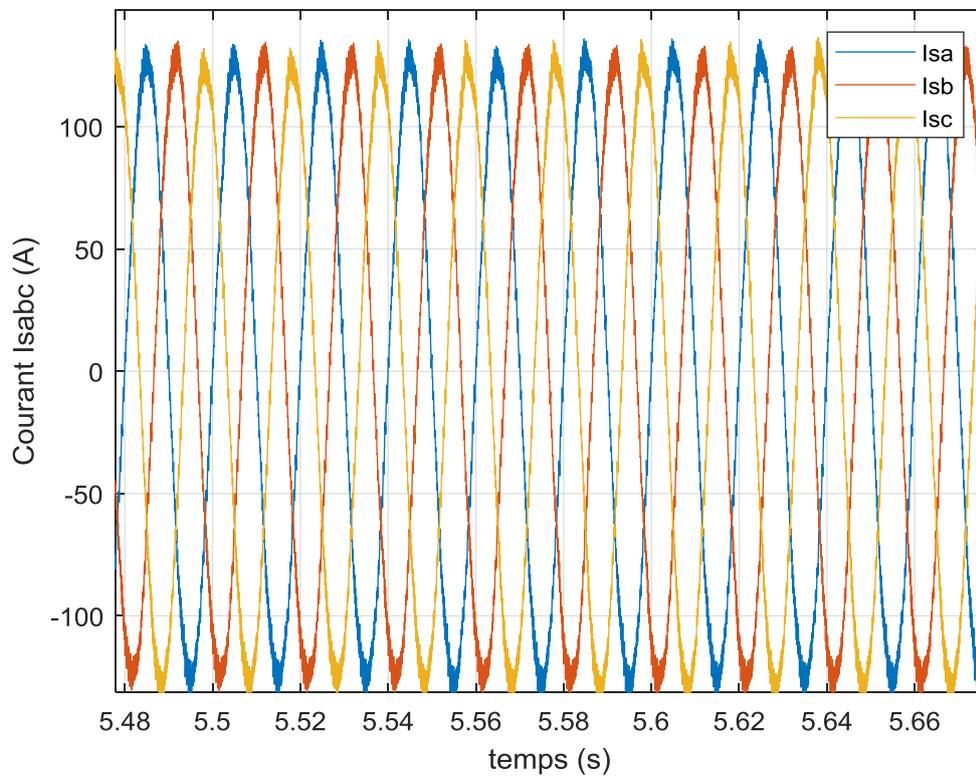


Fig. IV. 26. Zoom courants triphasés

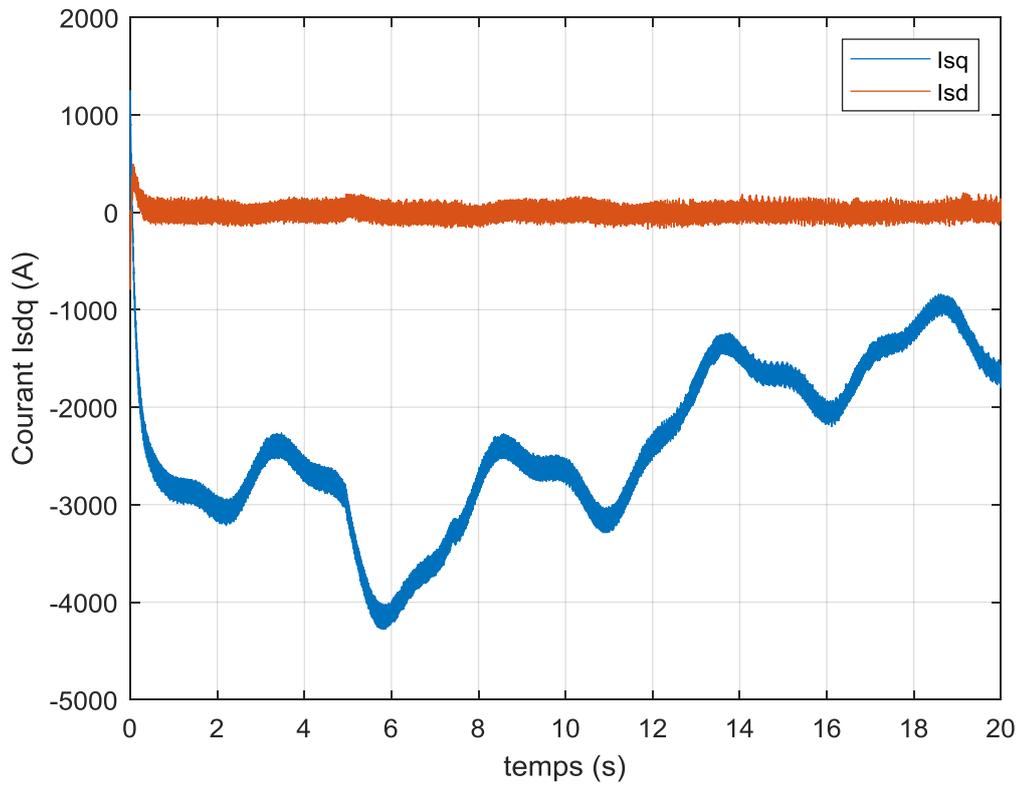


Fig. IV. 27. Courant Isd et Isq

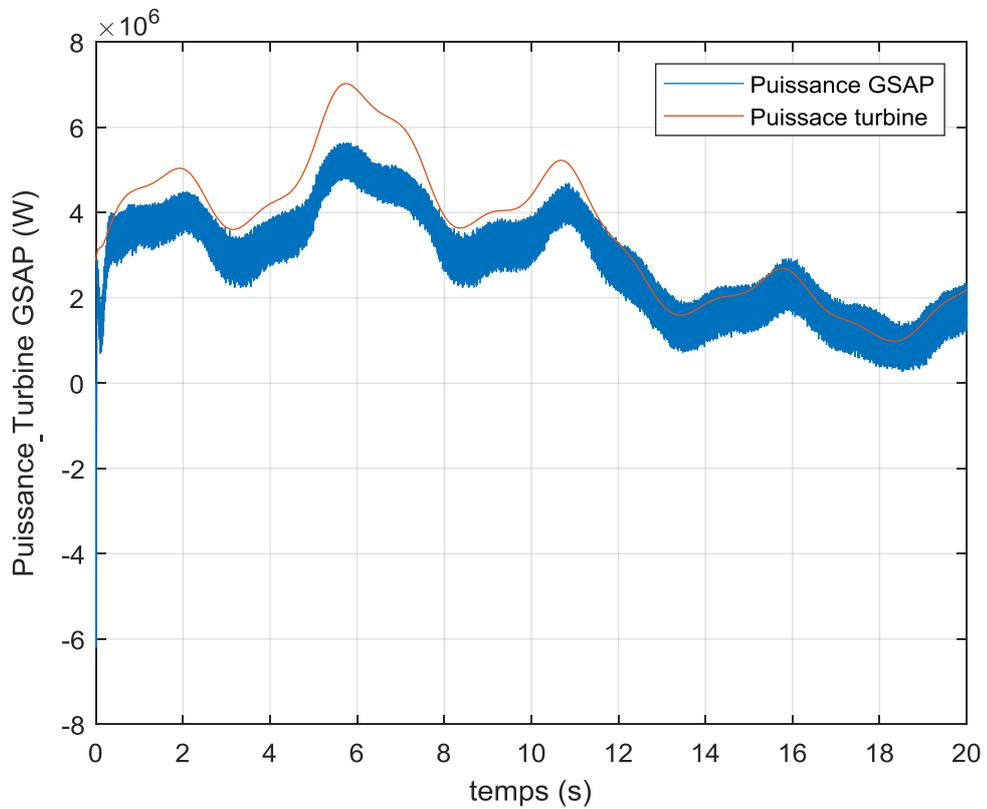


Fig. IV. 28. Puissance de la GSAP et Turbine courants

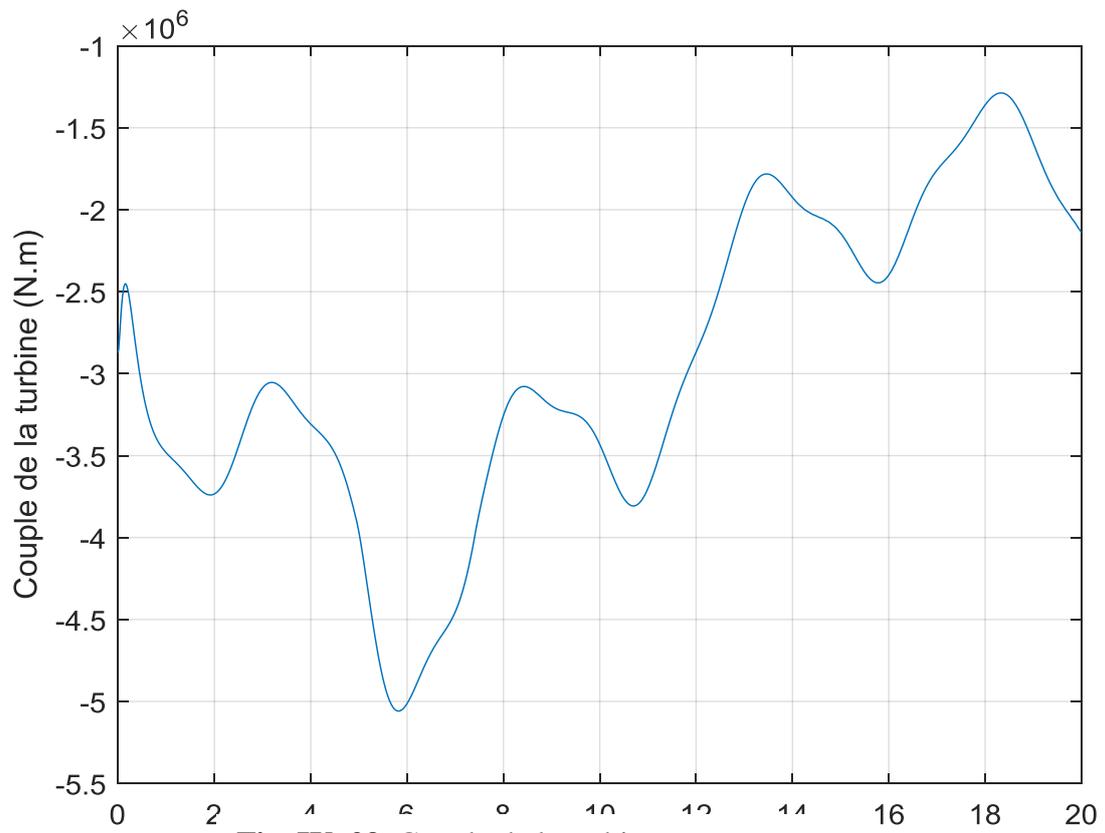


Fig. IV. 29. Couple de la turbine

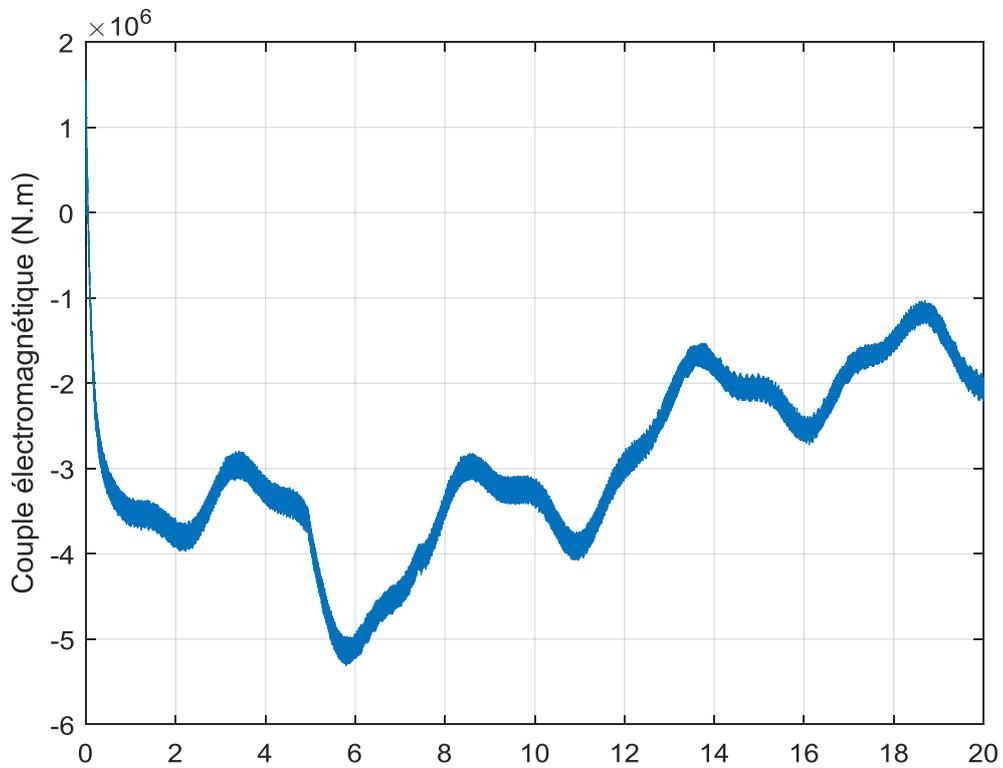


Fig. IV. 30. Couple Electromagnétique

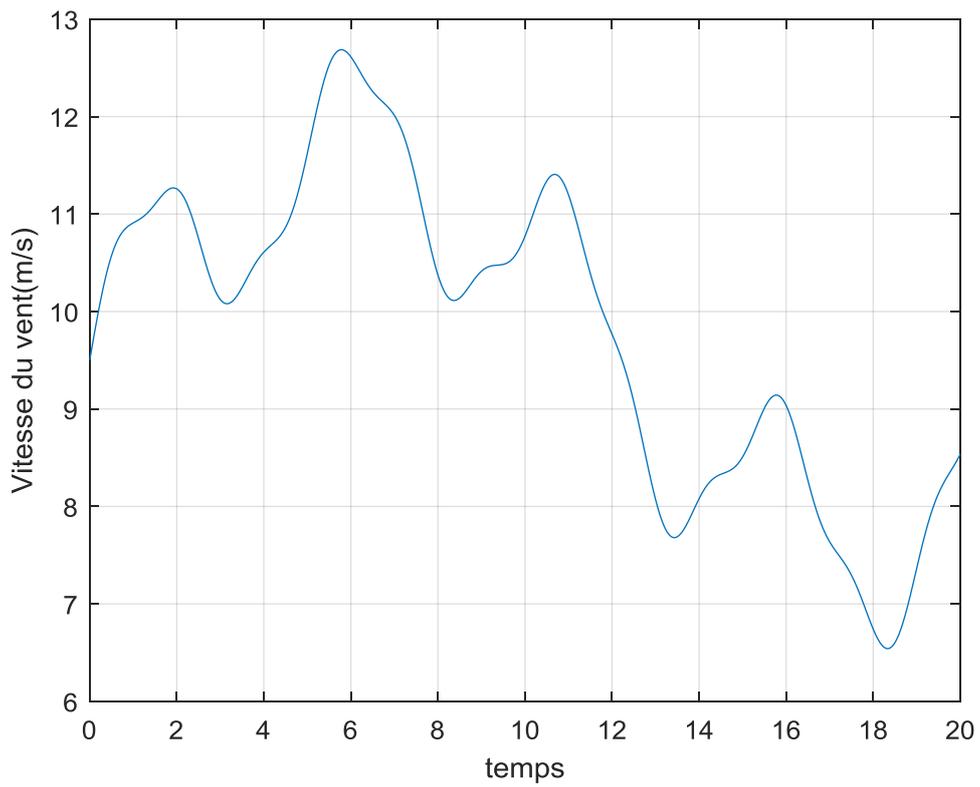


Fig. IV. 31. Vitesse du vent

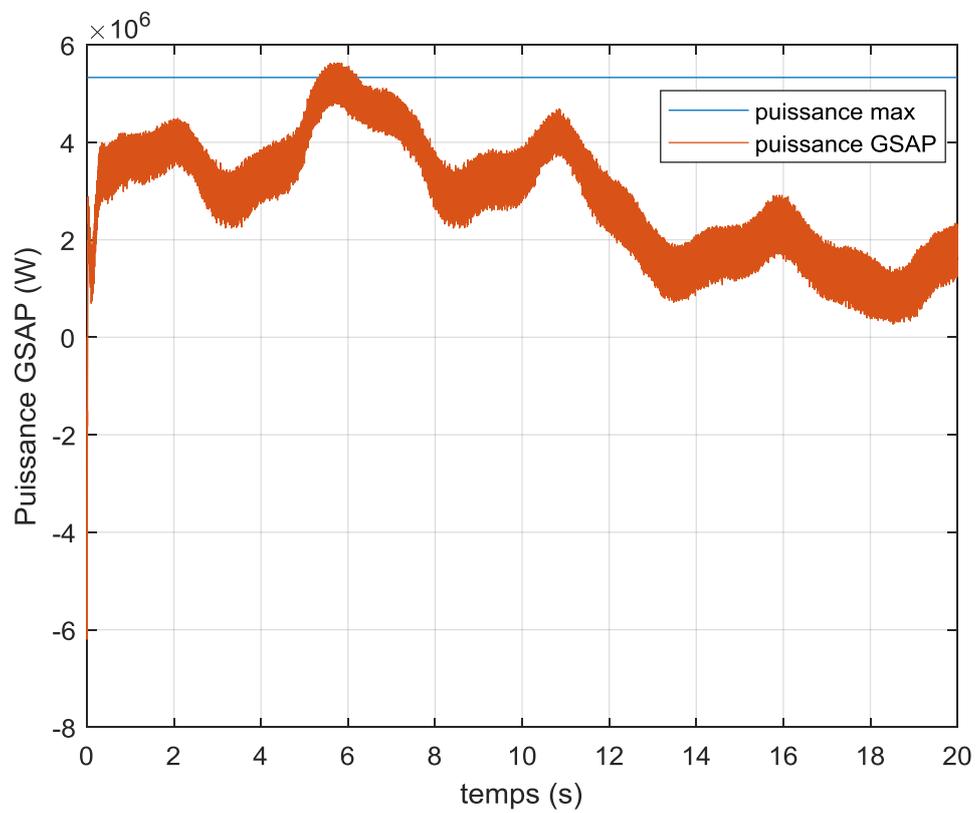


Fig. IV. 32. Puissance de la GSAP

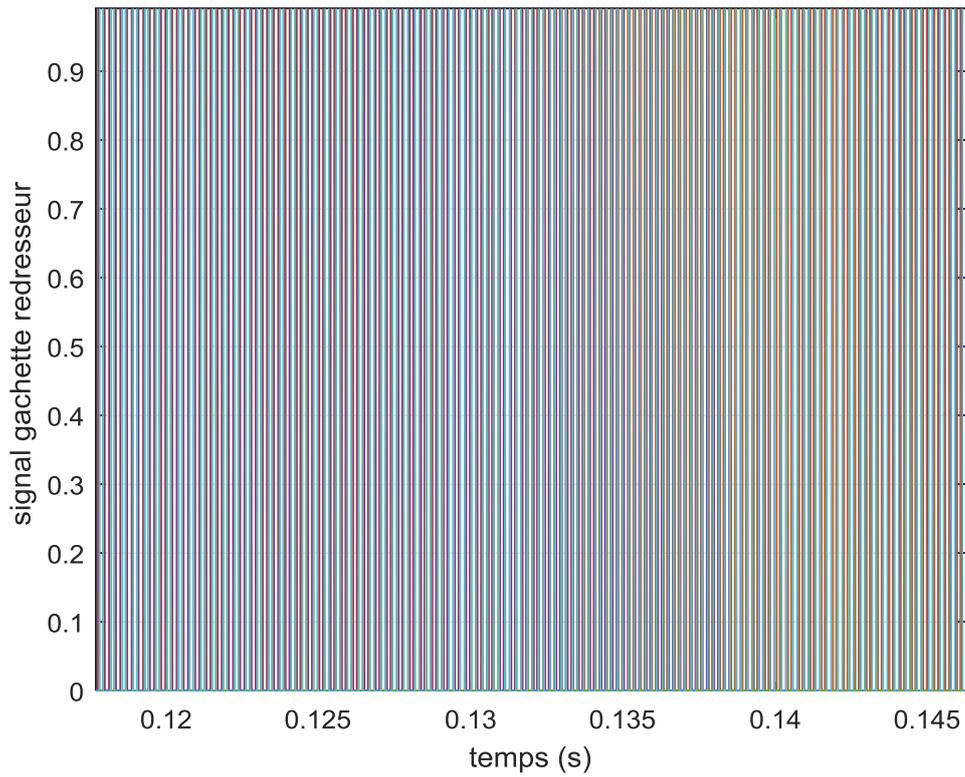


Fig. IV. 33. Zoom signal gâchette redresseur

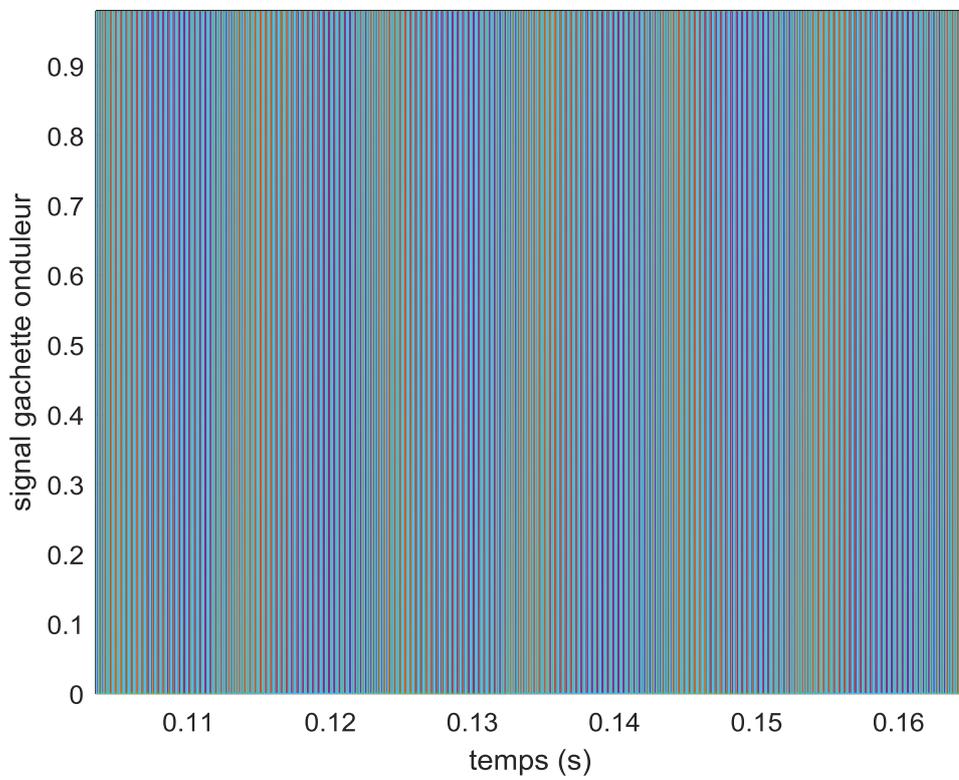


Fig. IV. 34. Zoom signal gâchette onduleur

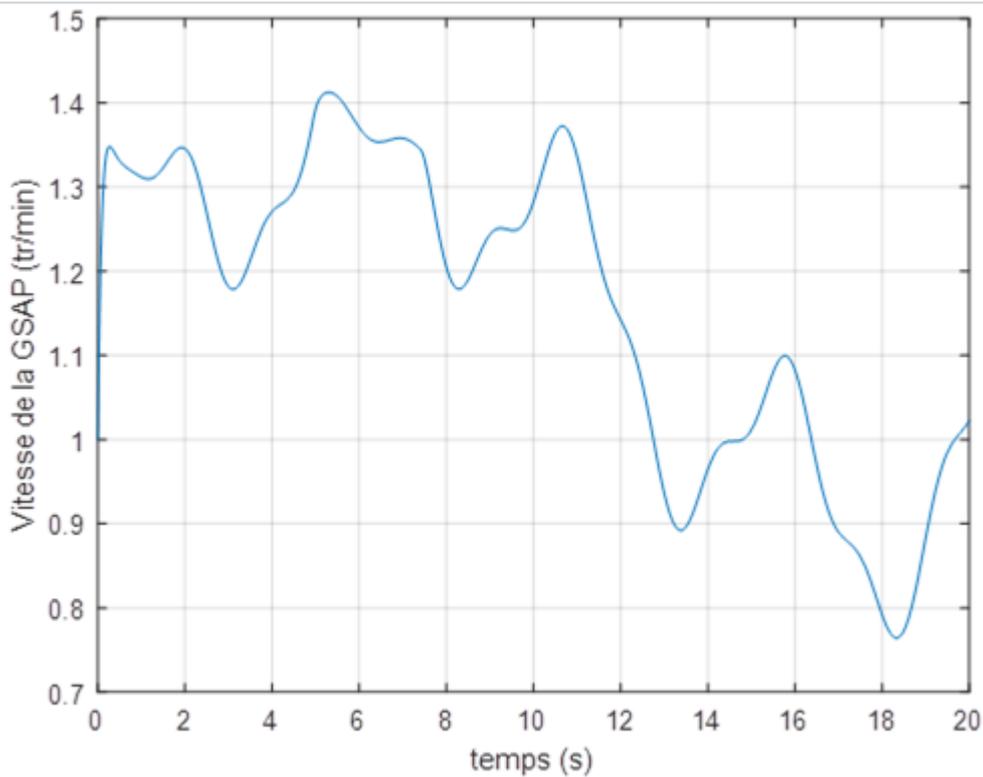


Fig.IV.35. Vitesse de la GSAP

IV. 17 Interprétations des résultats de simulations

La simulation du système considéré est une phase primordiale de son développement. Les progrès réalisés en informatique et en génie de logiciels permettent de prévoir les performances et d'envisager l'optimisation des machines électriques. Ainsi, la simulation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre, elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce qu'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir le comportement de la machine dans des cas extrêmes.

Les simulations de fonctionnement du système considéré sous l'environnement Matlab/Simulink permettent de prévoir le comportement de la machine et l'influences de ses différents paramètres sur son fonctionnement et son comportement et à la validation des modèles mathématiques des différents éléments dans la chaîne de conversion considéré et de la commande appliquée.

Le profil du vent appliqué à la turbine éolienne est représenté par la figure IV.6 qui est caractérisé par une valeur moyenne de 10 m/s. La figure IV.22 représente la structure des blocs de simulation et de commande de l'ensemble (Turbine-Générateur).

La figure IV.23 et figure IV.24 représentent les courbes des trois tensions issues de la génératrice et leur zoom respectivement. Il est clair que la tension varie suivant la vitesse du vent en augmentation ou en diminution.

Dans la Figures IV.25 et IV.26, on a représenté les courants issus de la génératrice. Il est à noter aussi que les variations du courant sont l'image des variations de la tension et les courbes des courants Isd et Isq sont donnés par la figure IV.27.

Les puissances issues de la simulation du générateur synchrone à aimant permanent et de la turbine sont données par la figure IV.28. Les couples de la turbine et le couple électromagnétique sont représentés respectivement par la figure IV.29 et figure IV.30. Les courbes de la puissance de la génératrice synchrone à aimant permanent, le signal de la gâchette du redresseur et de l'onduleur sont données aussi respectivement par les figures IV.32, IV.33 et IV.34. Nous constatons que la variation de la puissance active est fluctuée par la variation du profil du vent et que la puissance réactive est nulle.

Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique est liée directement à la variation de la vitesse de la génératrice et qui est liée réciproquement à la variation de la vitesse du vent, ce qui montre l'influence de la variation du vent sur la vitesse mécanique de la turbine et par la suite sur la puissance électrique produite. La puissance électrique est considérée égale à la puissance électromagnétique en négligeant les pertes électriques, cette puissance est définie par le couple électromagnétique et s'oppose à la puissance aérodynamique.

Les résultats de simulation montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent. Ce contrôle est très dynamique et la puissance obtenue en régime transitoire est donc plus importante et des différentes simulations ont été envisagées afin d'étudier le comportement de la turbine éolienne sans et avec asservissement de la vitesse de vent. Aussi, nous pouvons déduire que toutes les variables sont influencées par la variation du vent autour du point nominal

IV. 18 Conclusion

Le système éolien étudié est un système complexe composé de plusieurs sous-systèmes appartenant à plusieurs domaines physiques différents, à savoir, la mécanique des fluides, la mécanique traditionnelle, l'électrotechnique, et l'électronique et l'automatique. L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La turbine est accouplée à la génératrice et permet la transformation d'énergie mécanique en énergie

électrique. Les composants électriques tels que les convertisseurs statiques et l'élément de filtrage disposés en aval de la génératrice, ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les principales caractéristiques de la turbine éolienne, suite à une étude aérodynamique. Nous avons expliqué les différentes zones de fonctionnement et les différentes stratégies de contrôle de la puissance relatives à chaque zone. Nous avons utilisé un correcteur PI dans la boucle de régulation de vitesse et le comportement de la turbine pouvait donc être observé à travers un modèle de simulation. Les résultats de simulation obtenue montrent la validité des modèles envisagés et l'efficacité de la stratégie de limitation de la puissance recueillie par la turbine éolienne et nous avons présentés la structure globale de cette chaîne avec une modélisation détaillée des différents éléments et une simulation comportementale du système complet sur le plan électrique et énergétique.

CONCLUSION

CONCLUSION

GENERALE

GENERALE

Conclusion générale

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne connaît un grand essor et une très forte croissance au cours de la dernière décennie grâce aux avantages qu'elle présente pour l'environnement et aux percées technologiques connexes. L'électricité consommée dans le monde est surtout d'origine fossile. Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) sont responsables des émissions de gaz à effet de serre qui augmentent le réchauffement climatique.

Les sources d'énergies renouvelables apparaissent comme une solution à ce problème et remplacer les énergies conventionnelles. Elles ont atteint une maturité technique qui leur permet de devenir un segment important de l'industrie de l'énergie. Pour intégrer ces sources dans le système électrique conventionnel, la structure du système électrique doit être modifiée. Le concept des micro grids est considéré comme la solution appropriée pour l'intégration au réseau des sources renouvelables. Ces dernières se développent à un rythme rapide dans le monde pour générer le besoin d'électricité et pour diminuer la pollution. Cependant, en raison de leur dépendance aux conditions météorologiques, les sources renouvelables imposent de nouveaux défis au système électrique.

Le système éolien est parmi les systèmes les plus utilisés comme source d'énergie renouvelable grâce à ces plusieurs avantages environnementaux et économiques. Il peut être installé dans toutes les régions ventées en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur.

Dans ce contexte, un système de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents associée avec une turbine et des convertisseurs statiques de puissance pour la production de l'énergie électrique a été abordé dans ce mémoire. Ce choix est justifié par l'intérêt que portent les chercheurs et les industriels à ce type de structures d'éoliennes. En effet, le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques permet une meilleure utilisation des génératrices synchrones à aimant permanent et à moindre coût pour la construction de grandes machines.

Pour cela, une description d'une manière générale des différents systèmes d'énergies renouvelables destinés à la production de l'énergie électrique, leurs technologies, architectures, leur principe de fonctionnement et leurs avantages et les inconvénients sont présentés. Le modèle de chaque élément constituant la chaîne de conversion est proposé. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet de la chaîne de conversion. Le modèle du système éolien, qui prend

en compte l'aérodynamique et la dynamique électrique d'un générateur en vue de sa commande est abordé. Le logiciel Matlab/Simulink est utilisé pour la simulation du modèle du système considéré. Les simulations de l'éolienne à base d'un générateur synchrone à aimant permanent associée à convertisseurs électroniques de puissance ont été analysés en fonction des performances lors de diverses entrées vitesses du vent. Par conséquent, les résultats de la simulation du le modèle mathématique du système complet est réalisé dans ce mémoire et les résultats de simulation obtenues montrent la validité et l'efficacité du système proposé.

BIBLIOGRAPHIQUE



Bibliographie

- [1] YOU MATTER world, « Energie renouvelable : définitions, exemple, avantage et limites », <https://youmatter.world/fr/definitions/energies-renouvelables-definition>, 24sep2020.
- [2] KABOU CHE Azouz, « cas d'Eude : simulation sous trnsys16.1d'un appartement d'une tour multifonctionnelle à Constantine », Thèse master, juin 2012.
- [3] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla, « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne », <https://www.researchgate.net/publication/228353964>, janvier2010.
- [4] Dr BOUGUERNE, Chapitre5 «Centrales Hydrauliques», Chapitre6 «Energies Eoliennes », Thèse doctorat.
- [5] AZIZI Amina, « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride», Thèse doctorat, 2019.
- [6] MAHDAOUI Hamza, « Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP», Thèse master, 25 mai 2017.
- [7] HERISSI Belgacem, « Commande d'une Eolienne basée sur les modèles flous de Takagi-Sugeno», Thèse master, 2016.
- [8] merged-7, CHAPITRE I « Généralités sur les énergies renouvelables».
- [9] <https://www.connaissance-des-energies.org/fiche-pedagogique-eoliennes>.
- [10] news-26797-avis-ademe-eolien, « LES AVIS DE L'ADEME, L'énergie éolienne», Avril 2016.
- [11] « Etude de l'effet de l'intégration d'un parc éolienne dans le réseau algérien », 2014.
- [12] LOUAR FATEH, « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », Thèse doctorat, 2016.
- [13] BOUSMAHA Thawriyyaa et TAHIR Zineb, « Etude et Simulation d'une ferme éolienne en vue d'une application hybride », Thèse master, 19/06/2016.
- [14] Ziraoui Salah Eddine, « Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau », Thèse master, 2017.
- [15] YAICHI Hayat et GUENDOOUZ Sarah, « Modélisation et simulation d'un générateur synchrone à aimant permanent couplé à un aérogénérateur », Thèse master, 06/06/2018.

- [16] MEKKAOUI Naïma, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », Thèse master, 2004.
 - [17] Khelfat Lotfi ; Maataoui Lakhdar, « Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée », Thèse master, juin 2017.
 - [18] Berrak Nacer et Helimi Slimane, « Alimentation d'un site isolé par un système hybride (éolienne –diesel) », Thèse master, juin 2017.
 - [19] KADDOUR MEHDI et BOUSTER IMED, « Etude d'un système de conversion éolienne connecté au réseau », Thèse master, 2019.
 - [20] DOURARI ILYES, «Calcul analytique du champ dans une machine synchrone à aimants permanents à pôles lisses », Thèse master, 27 septembre 2017.
 - [21] Sonia MOUZAOU, « Etude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de Défauts de Courts-Circuits et de Désaimantations par la Méthode des Eléments Finis », Thèse master, 30 /09/ 2015.
 - [22] LATRECHE Mohammed Tahar, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Thèse master, 24 /06 /2012.
 - [23] AKABLI Yamina, « Modélisation Energétique et Prévisions de La Vitesse du Vent Menant à l'estimation de la Production d'énergie Eolienne », Thèse master, 2017.
 - [24] Hamecha Samira, Ep Bourekach, « Etude et Commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents », Thèse master, 2013.
 - [25] Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2005.
-

Résumé -

L'évolution croissante de la demande d'énergie, des besoins de l'humanité en matière d'énergie, de l'épuisement des combustibles fossiles, des préoccupations environnementales et de service, continuent d'augmenter surtout avec l'incertain et l'instabilité des prix des énergies fossiles. La libéralisation du marché électrique et une conscience environnementale des acteurs mondiaux pour l'intégration et le développement des énergies renouvelables qui permettant une production décentralisée de l'électricité et peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique. Les énergies renouvelables se développent à un rythme rapide dans le monde. Elles ont atteint une maturité technique qui leur permet de devenir un segment important de l'industrie de l'énergie. Cependant, en raison de leur dépendance aux conditions météorologiques, les sources renouvelables imposent de nouveaux défis au système électrique. Pour intégrer ces sources dans le système électrique conventionnel, la structure du système électrique doit être modifiée. Le concept des microgrids est considéré comme la solution appropriée pour l'intégration au réseau des sources renouvelables.

L'objectif de ce travail est la modélisation, simulation et commande d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents connectés aux réseaux. Dans un premier temps, le modèle de chaque élément constituant la chaîne de conversion est proposé. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est par la suite simulé dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du système de conversion d'énergie éolienne considéré qui peuvent être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat. Les résultats de simulation obtenues montrent la validité et l'efficacité du système considéré.

Abstract-

Growing trends in energy demand, humanity's energy needs, depletion of fossil fuels, environmental and service concerns, continue to increase especially with uncertainty and instability of fossil fuel prices. The liberalization of the electricity market and an environmental awareness of global players for the integration and development of renewable energies which allowing decentralized production of electricity and can help solve the problem of electrification of isolated sites where a large number of people are deprived of any energy supply. Renewable energies are developing at a rapid pace around the world. They have reached a technical maturity that allows them to become an important segment of the energy industry. However, due to their dependence on weather conditions, renewable sources pose new challenges to the power system. To integrate these sources into the conventional electrical system, the structure of the electrical system must be changed. The concept of micro grids is considered to be the appropriate solution for the integration of renewable sources into the grid.

The present work deals with the modeling, simulation and control of a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator connected to the grid. First, the model of each element constituting the conversion chain is proposed. The different constituents of the conversion chain are then connected together to form the complete model which is then simulated in the Matlab environment. The obtained simulation results show the feasibility and the possibility to analyze the behavior of the considered wind energy conversion system which can be useful for the implementation of an adequate control. The obtained simulation results show the validity and efficiency of the considered system.

ملخص –

يحفز الطلب المستمر والمتزايد على الطاقة، احتياجات البشرية لها، استنفاد الوقود الأحفوري وعدم استقراره، المخاوف البيئية والخدمية، تحرير سوق الكهرباء والوعي البيئي للفاعلين والمنتجين العالميين لاستخدام وتطوير الطاقات المتجددة التي تسمح بالإنتاج اللامركزي للكهرباء ويمكن أن تساعد في حل مشكلة كهربية المواقع المعزولة حيث يفتقر عدد كبير من الناس إلى أي مصدر للطاقة وهي أيضا بصدد النمو بوتيرة سريعة في جميع أنحاء العالم والذي سمح لها للوصول إلى مرحلة النضج التقني وأن تصبح قطاعاً مهماً في صناعة الطاقة. ومع ذلك، ونظراً لاعتمادها على الظروف الجوية، تشكل المصادر المتجددة تحديات جديدة لنظام الطاقة ودمجها في النظام الكهربائي التقليدي حيث يعتبر مفهوم الشبكات الصغيرة هو الحل المناسب لدمج المصادر المتجددة في الشبكة.

يهدف هذا العمل الى نمذجة ومحاكاة والتحكم في سلسلة تحويل طاقة الرياح بناءً على مولد متزامن مغناطيسي دائم متصل بالشبكات. حيث تم اقتراح في الأول نموذج كل عنصر يشكل سلسلة التحويل. ثم يتم ربط المكونات المختلفة لسلسلة التحويل معاً لتشكيل النموذج الكامل الذي يتم محاكاته بعد ذلك في بيئة Matlab. أتاحت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تحليل سلوك نظام تحويل طاقة الرياح المدروس والذي يمكن أن يكون مفيداً لتنفيذ نظام تحكم مناسب وتظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها قدرة وكفاءة النظام المدروس.