

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

Mémoire

présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

**Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une
machine synchrone à aimant permanent**

par :

Mr / Chekired choayb

et

Mr / Achour Aissam

Travail proposé et dirigé par :

Mr / HadeF Mounir

Promotion 2020

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Clément et Miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

*Les remerciements sont naturellement ensuite adressés en premier lieu à **Mr Hadeif Mounir** (encadreur), **Mr Maouch abdelaziz** et **Mr djaafer Lahlili** (co-encadreurs) pour m'avoir guidé tout au long de ce travail et pour m'avoir fait profiter de ses remarques, toujours pertinentes, ont grandement contribué à l'avancement de ce travail.*

Mes remerciements s'adressent, également, aux membres du jury, qui m'ont fait le très grand honneur de porter un jugement sur notre travail.

Finalement, ma reconnaissance va aussi à mes parents pour m'avoir permis de poursuivre mes études dans de très bonnes conditions.

J e dédie ce travail :

_ à ma mère et mon père pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, pour leur soutien continu durant mon travail. Que Dieu vous protège.

_ à mes frères, ma sœur et mon chère amie Nassima que Dieu vous garde, je vous aime et je vous souhaite une vie pleine de succès et de réussite.

_ À tout ma famille

_ Et enfin à tout ce ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans mon travail ainsi qu'à tout les membres de la promotion du Master Electrotechnique, option "Electromécanique".

J e dédie ce travail :

_ à ma mère et mon père pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, pour leur soutien continu durant mon travail. Que Dieu vous protège.

_ à mes frères, que Dieu vous garde, je vous aime et je vous souhaite une vie pleine de succès et de réussite.

_ À tout ma famille

_ Et enfin à tout ce ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans mon travail ainsi qu'à tout les membres de la promotion du Master Electrotechnique, option "Electromécanique".

Achour Aissam
Jijel , le 29 novembre 2020

Table des matières

Introduction générale	1
 Chapitre I : Théorie de l'énergie éolienne	
I.1 Introduction	2
I.2 Définition de l'énergie éolienne	2
I.3 L'énergie éolienne en quelques chiffres	4
I.3.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne	4
I.3.2 Futurs challenges et perspectives mondiales	5
I.4 Energie éolienne en Algérie	6
I.4.1 Gisement éolien en Algérie	6
I.4.2 Situation actuelle et future de la filière éolienne en Algérie	7
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	8
I.6 Types des éoliennes	10
I.6.1 Eoliennes à axe vertical	10
I.6.2 Eoliennes à axe horizontal	12
I.7 Constitution d'une éolienne horizontale	13
I.8 Conclusion	16
 Chapitre II : Eléments de la cascade de conversion de l'énergie éolienne	
II.1 Introduction	17
II.2 Types de machines utilisées dans le système éolien	17
II.2.1 Systèmes éoliens utilisant la machine asynchrone	17
II.2.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil	17
II.2.1.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA) type « rotor bobiné »	19
II.2.2 Systèmes éoliens utilisant la machine synchrone	21
II.2.2.1 Machine synchrone à rotor bobiné	22

II.2.2.2 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	23
II.2.3 Systèmes éoliens utilisant la machines à courant continu	25
II.3 Types des structures des cascades	25
II.3.1 Structure de cascade basé sur la machine asynchrone	25
II.3.1.1 Machine asynchrone à double alimentation– structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur	25
II.3.1.2 Structure Back-to-back	25
II.3.2 Structure de cascade basé sur machine synchrone	26
II.3.2.1 Structure de cascade basé sur machine synchrone à aimant permanent	26
II.4 Choix de la cascade	29
II.5 Modélisation de la cascade	29
II.5.1 Modélisation de la vitesse du vent	29
II.5.2 Modélisation de la turbine éolienne	31
II.5.3 Modèle du multiplicateur de vitesse	34
II.5.4 Modélisation de l'arbre	34
II.5.5 Simulation de la turbine	35
II.5.6 Etude et modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	40
II.5.7 Modélisation des convertisseurs statiques	49
II.6 Conclusion	55

Chapitre III : Etude de l'association du système Eolien

III.1 Introduction	57
III.2 L'association du système Eolien	57
III.2.1 Les résultats de simulation	59
III.2.2 Discussion et interprétation des résultats	65
III.3 Technique MPPT (Maximum Power Point Tracking)	65
III.4 Différents méthode de la MPPT	67
III.4.1 MPPT par la méthode de la vitesse spécifique optimale (TSR optimale) :	67
III.4.2 MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O)	68
III.4.3 MPPT par la méthode d'asservissement du signal de la puissance (PSF, power signal Feedback)	69

III.4.4 MPPT par la méthode de contrôle optimale de couple (OTC, optimal torque control)	69
III.5 Description du schéma de la commande	70
III.5.1 Commande de rapport de vitesse λ	71
III.5.2 Commande par MLI	72
III.5.3 Calcul des régulateurs	72
III.5.3.1 Régulateur de vitesse	72
III.5.3.2 Régulateur de courant	74
III.5.4 Découplage	76
III.6 Conclusion	77
Conclusion générale	78
BIBLIOGRAPHIE	79
ANNEXE	

Liste des Figures

Chapitre I	page
Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	2
Figure I.2 : Principaux organes du système de conversion éolien	3
Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Figure I.4 : Capacité éolienne cumulée dans le monde entier	5
Figure I.5 : L'énergie éolienne mondiale (MW)	6
Figure I.6: Carte de vent en Algérie	7
Figure I.7 : 1ere ferme éolienne en Algérie	8
Figure I.8: Technologie des éoliennes à axe vertical	11
Figure I.9: Technologie des éoliennes à axe horizontal	12
Figure I.10: Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	14
 Chapitre II	
Figure II.1: Eolienne à vitesse variable utilisant une MAS	18
Figure II.2 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau	19
Figure II.3 : Schéma de principe d'une MADA pilotée par le rotor	20
Figure II.4: Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné avec redresseur à diodes	23
Figure II.5: Système éolien basé sur une GSAP	24
Figure II.6: Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur	25
Figure II.7: MADA avec structure back-to-back	26
Figure II.8: Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur	27
Figure II.9: Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont	28
Figure II.10: Machine synchrone avec redresseur à diodes	28
Figure II.11: Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI	29
Figure II.12: Structure de cascade basée sur une MSAP avec redresseur à MLI	29
Figure II.13: Tube de courant autour d'une Éolienne	31
Figure II.14: Schéma de la turbine éolienne	32
Figure II.15: Évolution du coefficient de puissance de l'éolienne pour différents angles de calage	33
Figure II.16: Schéma bloc du modèle de la turbine	35
Figure II.17: Profile de Vitesse du vent	36
Figure II.18: Puissance du vent.	36

Figure II.19: Puissance mécanique	37
Figure II.20: Coefficient de puissance C_p	37
Figure II.21: La vitesse spécifique λ	38
Figure II.22: La vitesse de la turbine	38
Figure II.23: La vitesse mécanique	39
Figure II.24: Couple de la turbine	39
Figure II.25: Couple mécanique	40
Figure II.26 : Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)	41
Figure II.27 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park	42
Figure II.28: Passage du repère naturel du stator au repère (d, q) de Park	43
Figure II.29: Modèle de PARK pour la GSAP	44
Figure II.30: La vitesse de la machine	47
Figure II.31: Les tensions V_{abc} .	47
Figure II.32: Les courants I_{abc}	48
Figure II.33: La puissance de la génératrice	48
Figure II.34: Le couple électromagnétique	49
Figure II.35: Redresseur MLI	50
Figure II.36: Comparaison de la porteuse et la référence sinusoïdale	52
Figure II.37: Le signal de commande S_a et S_a inverse.	53
Figure II.38: Les signaux de commande	53
Figure II.39: Les signaux de références	54
Figure II.40: Le courant redressé	54
Figure II.41: Le courant redressé et filtré	55
Figure II.42: Les tensions de l'entrée du redresseur	55

Chapitre III

Figure III.1: structure de la cascade étudiée.	58
Figure III.2: Un profil de la vitesse du vent	59
Figure III.3: Les différentes vitesses	59
Figure III.4: Les différents couples.	60
Figure III.5: Le couple électromagnétique.	60
Figure III.6: Les courbes de puissances.	61
Figure III.7: Les tensions de la machine.	61

Figure III.8: Zoom sur les tensions de la machine.	62
Figure III.9 : Les courants de sortie de la machine.	62
Figure III.10: Zoom sur les courants de sortie de la machine.	63
Figure III.11: Le courant redressé i_{dc} (de charge).	63
Figure III.12: La tension redressée V_{dc}	64
Figure III.13 : La puissance électrique.	64
Figure III.14 : Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance - vitesse de rotation	66
Figure III.15 : Schéma block de la méthode de MPPT lambda optimal (TSR)	67
Figure III.16 : Schéma block de la méthode de MPPT lambda optimal (TSR)	68
Figure III.17 : Caractéristique de Puissance d'une éolienne en fonction de Tension	68
Figure III.18 : Le Block Diagramme de la méthode de retour de signal de puissance	69
Figure III.19 : MPPT par contrôle optimale de couple (OTC)	70
Figure III.20 : Schéma global de la chaine de conversion et de sa commande.	71
Figure III.21 : Boucle de régulation de vitesse.	72
Figure III.22 : Boucle de régulation de courant.	75
Figure III.23 : Description du découplage.	76

Liste des Symboles	
ρ	La densité de l'air (Kg/m^3)
S	La surface circulaire balayée par la turbine (m^2), $S = \Pi. R^2$
C_p	Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine
R	Rayon de la pale (m)
λ	Ratio de vitesse
β	Angle d'orientation des pales (degré)
G	Gain de multiplicateur
P_m	Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice (W)
V_{vent}	La vitesse du vent (m/s)
V_2	La vitesse du vent en aval de la turbine
P_v	la puissance extraite du vent
P_{tur}	la puissance extraite (disponible sur l'arbre mécanique) du vent
Ω_{tur}	Vitesse angulaire de la turbine (rad/s)
$\Omega_{\text{méc}}$	La vitesse mécanique (rad/s)
Ω_g	La vitesse de la génératrice (rad/s)
C_{tur}	Le couple de la turbine (Nm)
J_T	Inertie totale du système ramenée sur l'arbre de la génératrice
$C_{\text{méc}}$	Couple mécanique sur l'axe du générateur
C_{arbre}	Couple au niveau de l'arbre
C_{vis}	Couple de frottements visqueux
f_v	Coefficient de frottement visqueux total
C_{em}	Le couple électromagnétique (Nm)
v_a, v_b, v_c	Tension de la génératrice (v)
i_a, i_b, i_c	Courant de la génératrice (A)
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	Flux aux phases a, b et c (Web)
$[P(\theta)]$	La matrice de Park
$[P(\theta)]^{-1}$	La matrice inverse de Park
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator (Ω)
φ_f	Flux des aimants permanents (Web)
v_d	Tension selon l'axe d (V)
v_q	Tension selon l'axe q (V)
i_d	Courant selon l'axe d (A)
i_q	Courant selon l'axe q (A)
φ_d	Flux selon l'axe d (Web)
φ_q	Flux selon l'axe q (Web)

ω	Vitesse de rotation électrique (rad/s)
L_d	Inductance statorique selon l'axe d (H)
L_q	Inductance statorique selon l'axe q (H)
θ	L'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (rad)
C_r	couple résistant
P	Nombre de paires de pôles
J	Moment d'inertie total de la machine (Kg.m ²)
φ_{sf}	Le flux inducteur
i_{red}	courant redressée (A)
V_{dc}	tension redressée (V)
S_a, S_b, S_c	Etats de commutation du redresseur
i_{ch}	Courant de la charge (A)
R_{ch}	Résistance de la charge (Ω)
m	L'indice de modulation
r	Le taux de modulation
$V_{ref1}, V_{ref2}, V_{ref3}$	Les tensions de référence de MLI (V)
V_p	La tension de porteuse (V)
Kp	Le gain proportionnel
Ki	Le gain intégral
ξ	Coefficient d'amortissement
τ	La constante de temps électrique

Liste des Abréviations

SCE	Système de Conversion Eolien
FMM	Force magnétomotrice
GSAP	Générateur Synchrone à Aimants Permanents
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum power point tracking
WECS	Wind Energy Conversion System
OTC	Optimal torque control
PSF	power signal Feedback
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouverte
FTBF	Fonction de transfert en boucle fermée

INTRODUCTION GENERALE

Produire de l'électricité en utilisant des ressources d'énergie renouvelables devient de plus en plus une nécessité, vue l'épuisement des ressources fossiles et la dégradation de l'environnement provoquée par les déchets des centrales thermiques classiques. La production d'électricité par des ressources renouvelables est certes moins avantageuse et financièrement moins rentable à court et moins terme que d'exploiter les ressources fossiles existantes, mais il faudrait s'atteler à ses nouvelles technologies du futur.

C'est dans ce cadre que se place notre travail, qui consiste à étudier un système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion est effectuée à la base des turbines éoliennes qui actionne des machines électriques. Il existe plusieurs variantes des types des turbines et des machines électriques utilisées, ainsi que la façon de leur raccordement et mise en cascade.

Le système étudié dans ce mémoire est constitué d'une turbine éolienne connecté à une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) à travers un multiplicateur de vitesse. La puissance électrique alternative générée par la machine synchrone à aimant permanent est convertie en forme continue un redresseur MLI.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à un état de l'art et notions générales sur l'énergie éolienne. Nous exposerons quelque chiffre de l'énergie éolienne dans le monde et dans l'Algérie, et aussi nous décrirons des différents types d'éolienne, et les avantages et les inconvénients de chaque type. Aussi nous présenterons les constitutions d'une éolienne.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la présentation des types des cascades de conversion, et nous nous intéresserons à une structure de cascade pour notre travail (turbine, GSAP, redresseur). Nous indiquerons la modélisation et la simulation des différentes parties de cette cascade.

Dans le troisième chapitre on présentera l'association des parties de la cascade. On simule son fonctionnement en boucle ouverte, et on étudie en détail les parties de la boucle de sa commande.

I.1 Introduction

L'énergie éolienne est employée pendant longtemps dans les fermes pour rectifier les grains ou l'eau de pompe sous forme de moulin de vent. Le principe est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Aujourd'hui, ce principe est appliqué à l'énergie éolienne dans le système d'alimentation, mais on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70, résulte de deux préoccupations: d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles, qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie, de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive, par rapport aux sources traditionnelles de même puissance [1].

Dans ce premier chapitre, nous présenterons l'état de l'art de l'énergie éolienne, de manière générale, les différents types des éoliennes, et les différents constituants d'une éolienne.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.1).

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le plus souvent, cette énergie est elle-même transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs [02].

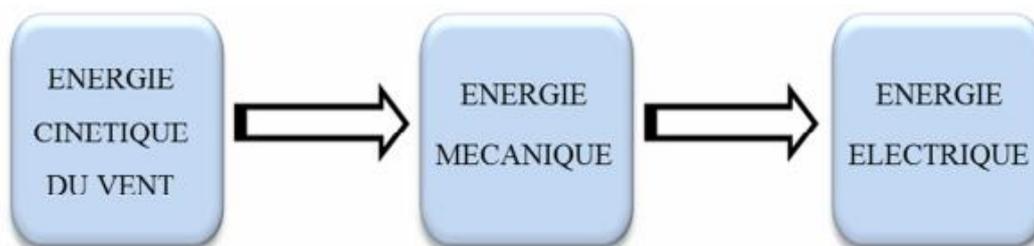


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [02]

Le système de Conversion Eolien (SCE) est constitué d'un générateur électrique, entrainé par une turbine éolienne à travers le multiplicateur d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique (Figures I.2 - I.3) [03].

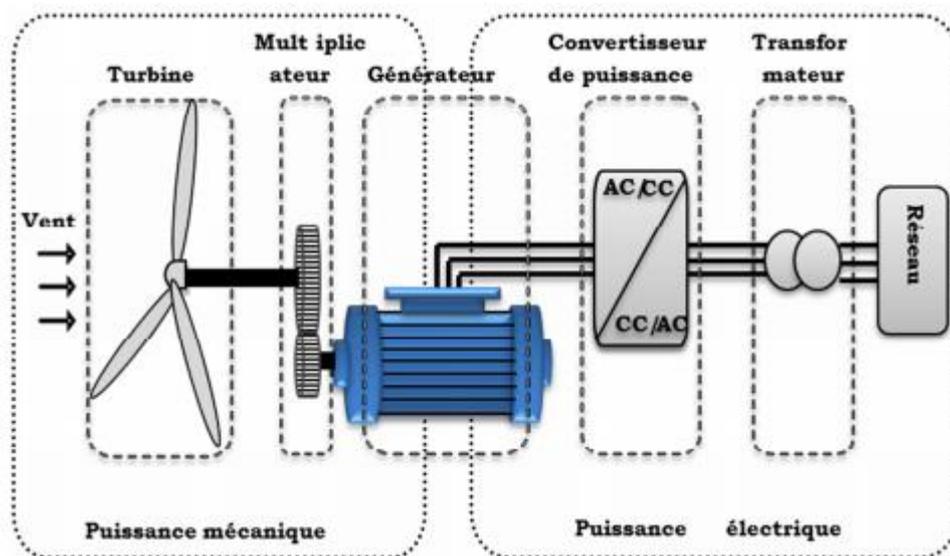


Figure I.2 : Principaux organes du système de conversion éolien [03]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts), dans des zones géographiquement dégagées, pour éviter les phénomènes de turbulences [01].

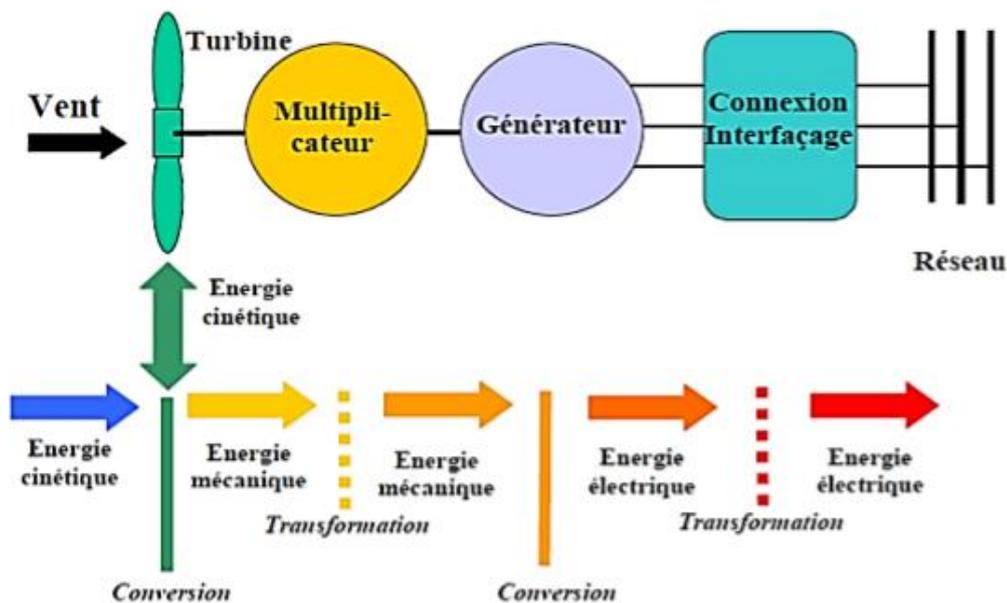


Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [04]

I.3 L'énergie éolienne en quelques chiffres

I.3.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (Figure I.4). Ceci est principalement, dû à deux raisons:

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

Le marché de 2016 était supérieur à 54 GW, ce qui a donné une capacité installée totale globale de 487 GW, soit une croissance cumulée de 12.47%, Dirigé par la Chine, les États-Unis, l'Allemagne et l'Inde. L'Allemagne est restée le premier marché sur le continent Européen en 2016 (5.4 GW), les installations américaines de 8 203 MW étaient presque égales au marché fort de 2015, ce qui porte le total des États-Unis à plus de 82 GW . Le marché offshore chinois en 2016 a atteint la 3ème place du classement mondial, après le Royaume-Uni et Allemagne [04].

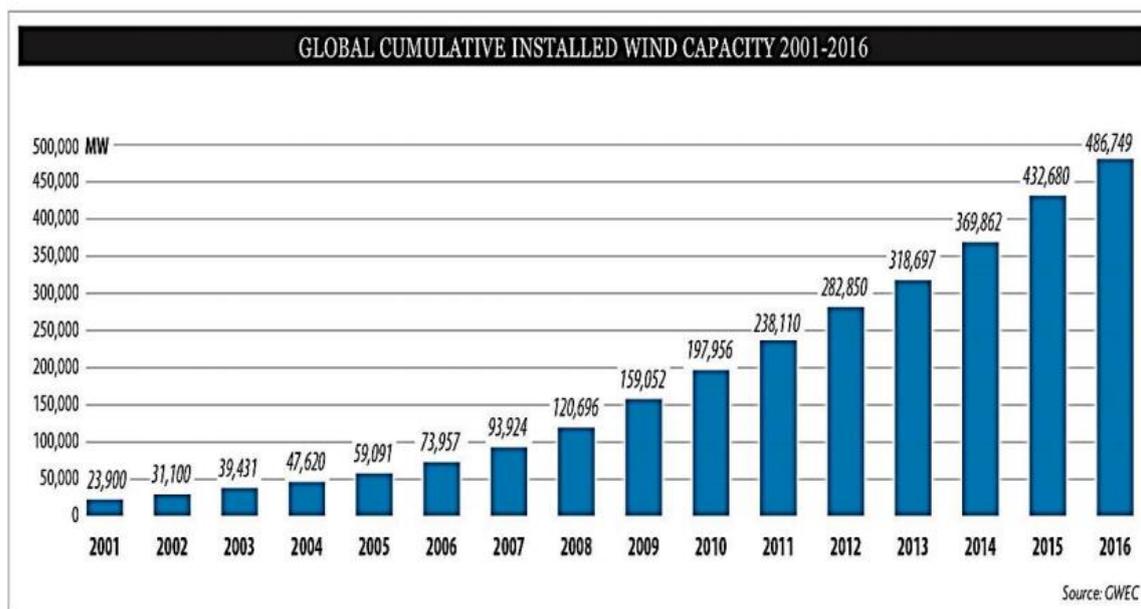


Figure I.4 : Capacité éolienne cumulée dans le monde entier [04]

I.3.2 Futurs challenges et perspectives mondiales

Sur la base de l'expérience et des taux de croissance des années passées, les prévisions montrent que l'énergie éolienne continuera son développement dynamique dans les années à venir. Malgré les impacts à court terme de la crise financière actuelle, qui rendent difficile les prévisions à court terme, on peut attendre, qu'à moyen terme, l'énergie éolienne attirera les investisseurs grâce à son faible risque et au besoin d'énergie propre et fiable.

De plus en plus, les gouvernements comprennent les bénéfices multiples de l'énergie éolienne et mettent en place des politiques favorables, incluant la promotion des investissements décentralisés par des producteurs indépendants, petits, moyens ou basés sur des communautés, tous ouvrant la voie vers un système de production d'énergie, davantage renouvelable pour le futur [04].

En calculant rigoureusement et en prenant en compte des facteurs d'insécurité, on estime que l'énergie éolienne sera capable de contribuer en 2020 à au moins 12% de la consommation électrique mondiale. En 2018, une capacité totale de 1050 GW est possible. Fin 2020, au moins 1 500 GW peuvent être attendus [04].

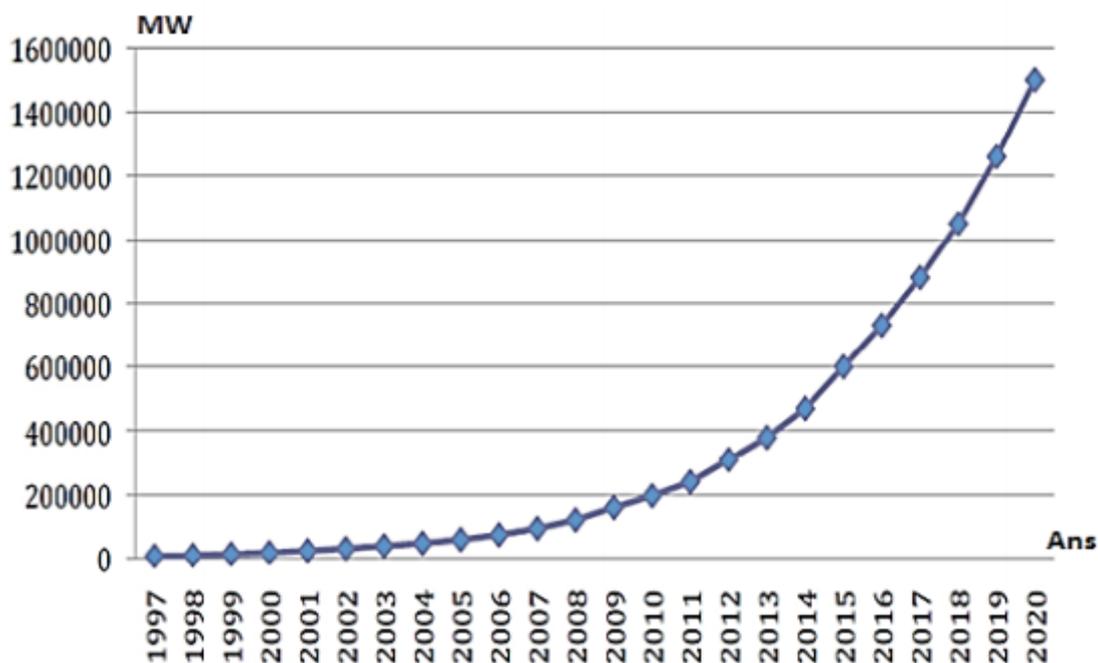


Figure I.5 : L'énergie éolienne mondiale (MW) [04]

I.4 Energie éolienne en Algérie

I.4.1 Gisement éolien en Algérie

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolien de la région.

Le travail le plus récent pour l'établissement des cartes des vents (Atlas des vents) en Algérie est celui de S. Boudia dans sa thèse de doctorat en 2013 [04], où il a introduit des vitesses moyennes annuelles données de 24 stations météorologiques situées près des frontières Algériennes. La période de mesure s'est effectuée durant la dernière décennie à

10 m du sol. La figure I.6 montre la vitesse moyenne annuelle du vent en Algérie à 10 m du sol.

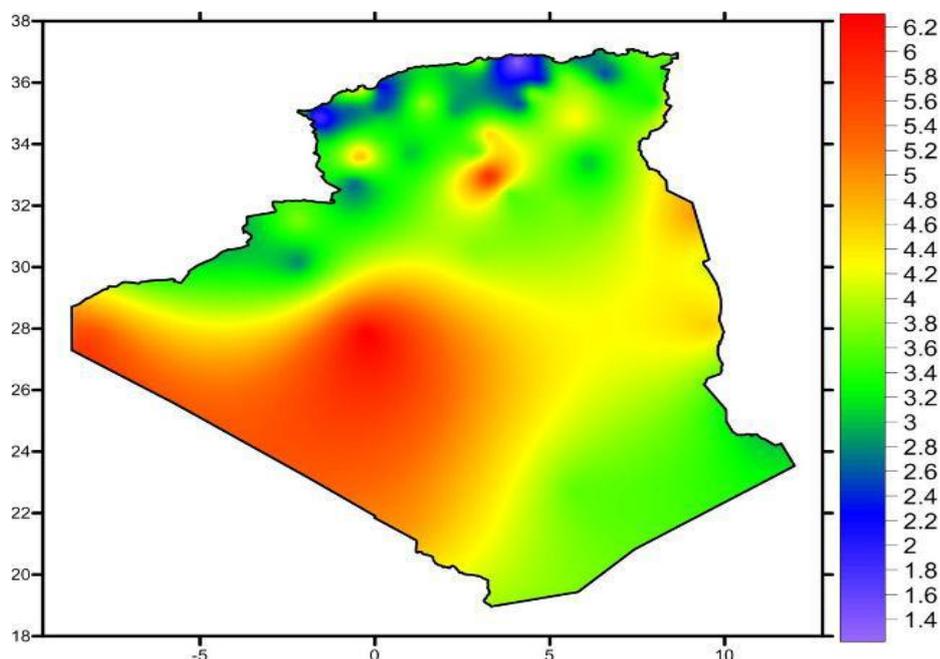


Figure I.6: Carte de vent en Algérie [05]

I.4.2 Situation actuelle et future de la filière éolienne en Algérie

Selon quelques évaluations, plus de cinq millions d'algériens ne sont pas raccordés au réseau d'électricité, alors que beaucoup de communautés rurales ont besoin d'eau potable et d'eau pour irrigation. Ces besoins ruraux représentent un marché potentiel pour des technologies d'énergie renouvelable. L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie 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 [06].

Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar, d'une capacité de 10 mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024. Constituée de 12 éoliennes, d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois de travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars.

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien [06].



Figure I.7 : 1^{ère} ferme éolienne en Algérie [06]

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après [03].

I.5.1 Avantages [04] [07]

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement:

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète, en général.
- L'exploitation de cette énergie éolienne ne produit pas de CO₂, ni d'autres gaz à effet de serre.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole.
- Leur développement offshore présente un potentiel non négligeable.
- Implantées localement, les éoliennes peuvent permettre de répondre à des besoins électriques importants, tout comme à des besoins domestiques limités, selon leur taille.

I.5.2 Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [07].
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu, grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le

bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée [05].

- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel [08].
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classiques, son coût reste encore, plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [05].
- L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent [08].
- C'est une source d'énergie intermittente [08].
- Les éoliennes peuvent provoquer des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores [08].
- Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin avec les autres usagers (pêcheurs, plaisanciers [08].

I.6 Types des éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se diffèrent essentiellement, dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol, il existe [09]:

- Eolienne à axe vertical.
- Eolienne à axe horizontal.

I.6.1 Eoliennes à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologies ont été testée, dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus (figure I.8) [09].



(a) Type Darrieus

(b) Type Savonius

Figure I.8: Technologie des éoliennes à axe vertical [09]

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [09]:

I.6.1.1 Avantages [07]

- Son axe vertical possède une symétrie de révolution, ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.
- Faible encombrement.
- Intégrable au bâtiment, esthétique.
- Système peu bruyant.
- Génératrice pouvant être placée au sol (selon les modèles).
- le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour.

I.6.1.2 Inconvénients [07]

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- Faible rendement.
- Masse non négligeable.

I.6.2 Eoliennes à axe horizontal

Actuellement, ce sont les éoliennes les plus répandues, sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent (figure I.9) [06].

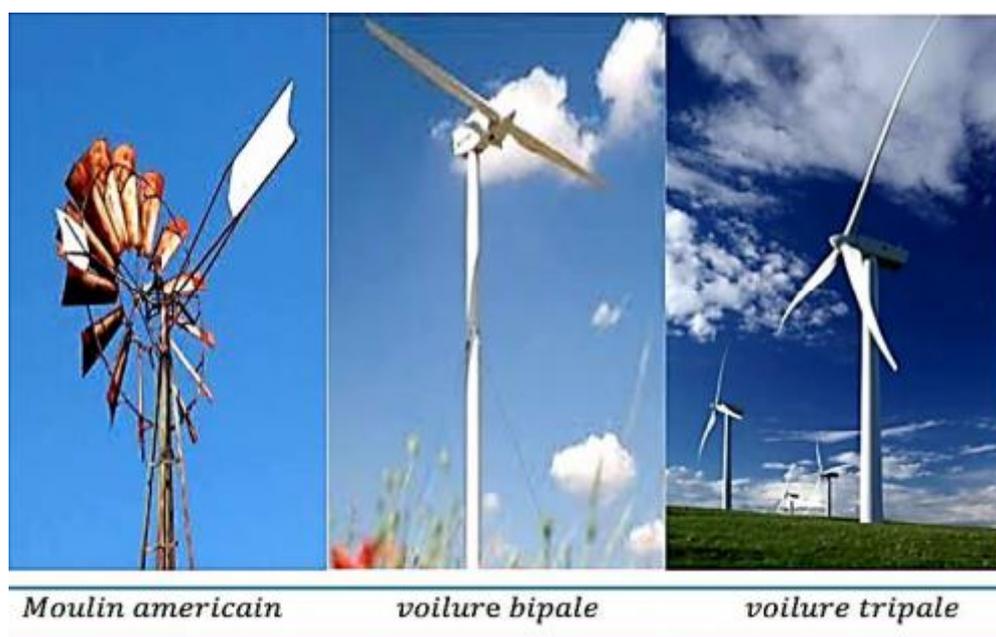


Figure I.9: Technologie des éoliennes à axe horizontal [06]

I.6.2.1 Avantages [04][10]

- 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.
- Coût limité.
- Peu de contraintes mécaniques.
- Grande efficacité.

I.6.2.2 Inconvénients [04] [10]

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

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance, destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [07].

I.7 Constitution d'une éolienne horizontale

Nous présentons les différents composants d'une éolienne à axe horizontal (Figure 1.10) [04].

- 1- Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique).
- 2- Moyeu du rotor en fonte.
- 3- Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4- Paliers du rotor à double rangée de billes.
- 5- Arbre lent du rotor en acier à haute résistance.
- 6- Multiplicateur de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
- 7- Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- 8- Accouplement avec la génératrice de type flexible.
- 9- Génératrice (800/200 kW) asynchrone refroidie à l'eau.

- 10- Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.
- 11- Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.
- 12- Système de contrôle surveillant et pilotant la turbine.
- 13- Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
- 14- Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
- 15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
- 16- Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
- 17- Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

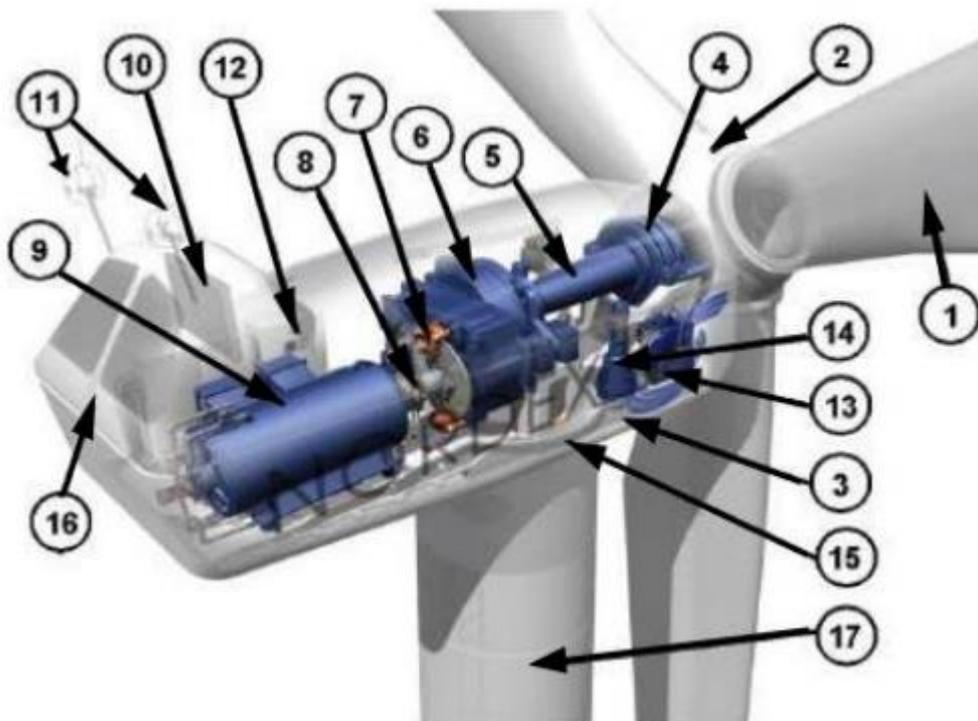


Figure I.10: Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal [04]

En général, l'éolienne à axe horizontal est constituée de trois éléments principaux: La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

- **La tour** : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique.

Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi pour permettre l'utilisation des pales plus longues.

La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle [04].

- **La nacelle** : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique.

Elle comprend les éléments suivants :

- L'arbre.
- Le multiplicateur.
- Les roulements.
- Le frein à disque permettant d'arrêter le système en cas de surcharge.
- La génératrice.
- Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent) [04].

- **Les pales** : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité [04].

- **Le moyeu** : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de la vitesse du vent [04].

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art et les notions générales sur l'énergie éolienne. Ensuite, quelques chiffres de l'énergie éolienne dans le monde et dans l'Algérie, ont été donnés.

Par la suite, nous avons détaillé les différents types d'éoliennes, les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal, les avantages et les inconvénients de chaque type. Aussi, les différents constituants d'une éolienne ont été présentés.

Ce chapitre suivant sera consacré à l'étude de tous les éléments de la cascade étudié.

CHAPITRE II :

ELEMENTS DE LA CASCADE DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, le concept de la chaîne de conversion éolienne à base de la génératrice synchrone à aimant permanent est proposé. Un modèle mathématique de simulation de l'ensemble, en prenant en considération son caractère multi-physique (prise en charge des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques) est réalisé. Une stratégie de commande de réglage de la vitesse de rotation de la turbine, de sorte à optimiser la puissance extraite, quel que soit la vitesse du vent, est proposée.

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne, basée sur les modèles du profil du vent, du comportement aérodynamique des pales, de l'aérogénérateur et des convertisseurs de puissance du système de commande, est détaillée dans ce chapitre [11].

Dans ce chapitre, nous présenterons les machines utilisées dans les systèmes éoliens, leurs avantages et inconvénients, et les types des structures des cascades, et nous nous intéresserons à une structure de cascade pour notre travail (turbine, GSAP, redresseur). Aussi, nous présenterons la modélisation de cette cascade et les résultats de la simulation.

II.2 Types de machines utilisées dans le système éolien

II.2.1 Systèmes éoliens utilisant la machine asynchrone

II.2.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones MAS sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle de puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien.

Une topologie consiste à relier la MAS à cage d'écureuil au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs statiques, un multiplicateur est associé à la machine. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité [04].

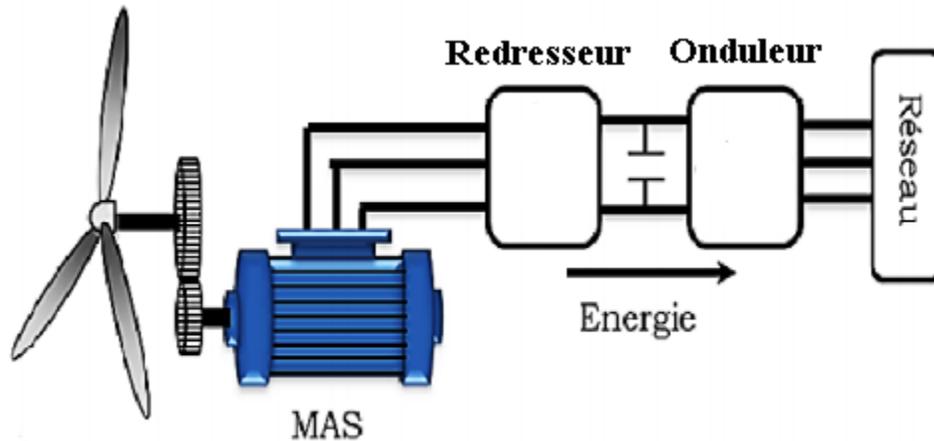


Figure II.1: Eolienne à vitesse variable utilisant une MAS [04].

C'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil, qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications, utilisant la machine asynchrone, sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois, extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure II-2).

La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine [12].

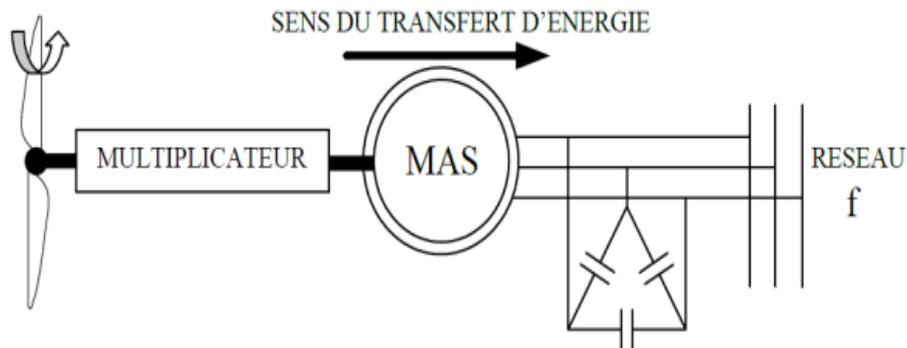


Figure II.2 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [12]

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance, théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées [12].

- **Avantages [13]**

- Elle possède un système électrique simple.
- Elle possède une très grande fiabilité.
- Elle est moins chère.

- **Inconvénients [13]**

- La puissance extraite est non optimisée.
- La magnétisation de la machine est imposée par le réseau.
- Il n'y a pas de contrôle de l'énergie réactive.

II.2.1.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA) type « rotor bobiné »

Dans ce cas, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors l'enroulement rotorique est connecté à ce même réseau via une interface d'électronique de puissance.

Le convertisseur de puissance connecté au rotor (coté rotor) partage un bus de tension continue avec un second convertisseur identique, connecté au réseau électrique (coté réseau) via un transformateur tel qu'illustré à la figure (II.3).

Le condensateur permet de découpler les deux convertisseurs et agit comme un réservoir d'énergie afin d'atténuer les perturbations de tension et courant lors des commutations. C'est le convertisseur coté rotor qui permet d'imposer les courants nécessaires afin de contrôler les puissances actives et réactives. Pour sa part, le convertisseur coté réseau s'occupe de maintenir la tension du bus constante en échangeant la puissance active fournie ou absorbée par le rotor avec le réseau électrique. La tension du rotor étant généralement différente de celle du stator, un transformateur est nécessaire afin d'adapter les différents niveaux de tension [14].

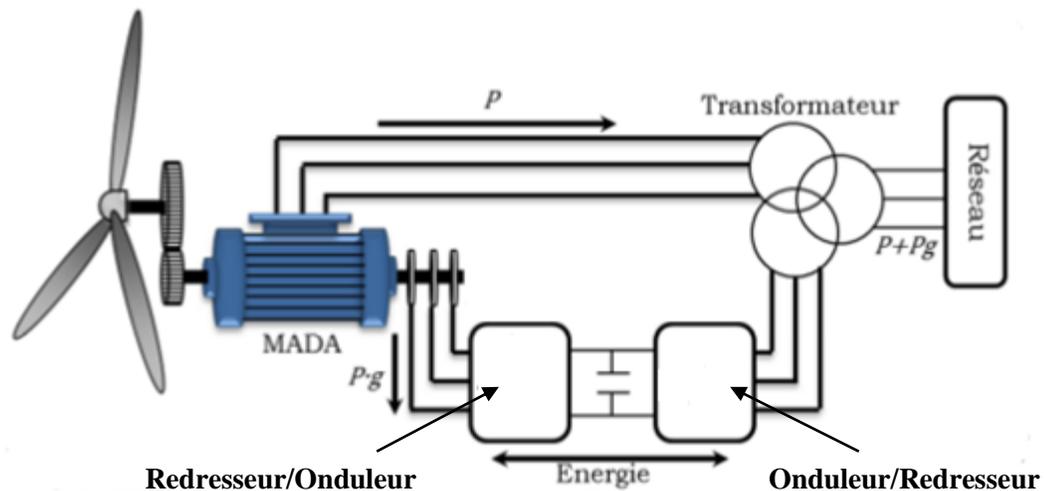


Figure II.3 : Schéma de principe d'une MADA pilotée par le rotor [07]

- **Avantages [15]**

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (Courant et tension) ce qui donne une grande flexibilité et une précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant, au-delà de la vitesse de synchronisme

- La configuration des deux convertisseurs, alimentant la machine permet de fonctionner en régime dégradé (Si l'un des deux onduleurs tombe en panne).
 - En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs, alimentant la machine permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures et une puissance mécanique fournie à la charge.
 - La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
 - Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
 - Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
 - La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir : Le fonctionnement à vitesse de rotation variable et la régulation découplée des puissances active et réactive.
- **Inconvénients [15]**
 - Machine plus volumineuse que la machine asynchrone classique. Généralement, elle est plus longue à cause des balais.
 - Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que la machine Classique.
 - Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

II.2.2 Systèmes éoliens utilisant la machine synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux à très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation reste fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi, les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs,

directement connectés au réseau. Elles sont par contre, utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [04].

II.2.2.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine (synchrone à rotor bobiné) possède l'inconvénient de la nécessité d'une source d'alimentation indépendante de l'inducteur en puissance. Un autre inconvénient est la nécessité d'un entretien régulier du système bagues-balais.

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet, bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machine avec le système éolien, précisément, pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande difficulté de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple attrapé par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et ils nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Fig. II.4) ce qui permet d'autoriser ou de permettre un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [07].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau [07]. Ci-dessous nous avons résumé les avantages et les inconvénients de l'utilisation de ce type des machines dans les systèmes de production de l'énergie à base des systèmes éoliens.

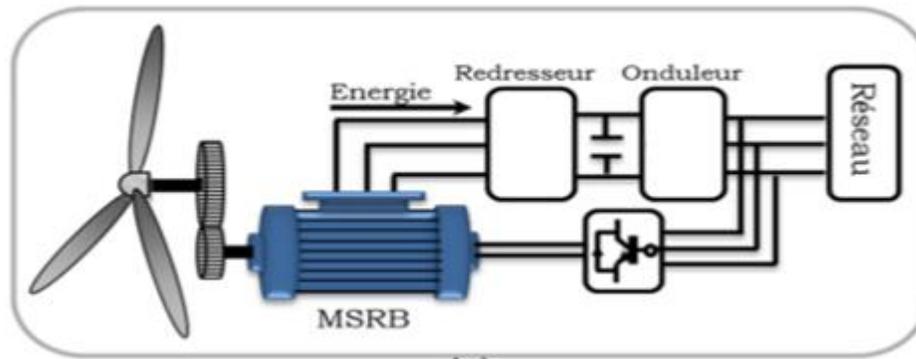


Figure II.4: Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné avec redresseur à diodes [07].

- **Avantages [16]**

- Rendement excellent.
- Très supérieur à celui de tous les autres types des machines.
- Sa vitesse est rigoureusement constante.
- On peut l'alimenter à des tensions élevées.
- Fonctionnement en moteur avec un bon facteur de puissance ou en compensateur pour fournir de l'énergie réactive.

- **Inconvénients [16]**

- Peut décrocher dans le cas d'une surcharge brusque ou d'une chute de tension importante du réseau.
- A besoin d'une génératrice à courant continu pour assurer l'excitation.
- Ne peut démarrer qu'à des faibles charges.

II.2.2.2 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les systèmes de conversion, basés sur des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles. Ce mode de transformation de puissance (transmission directe), offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes, elle a une particularité liée à son aimantation permanente à plusieurs pôles qui lui permet d'éliminer plusieurs types de pertes de puissance et de bruit, mais aussi, l'absence des systèmes à frottement

tels que les bagues au rotor et la possibilité de non utilisation de multiplicateur de vitesse. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible pour ce cas des machines.

Les éoliennes à base de MSAP présentent un bon rendement, un facteur de puissance élevé et un taux de défaillance minime, par rapport aux autres machines, elles ne nécessitent presque aucun entretien puisque il n'y a que des hélices qui sont en mouvement (Figure. II.5) [17].

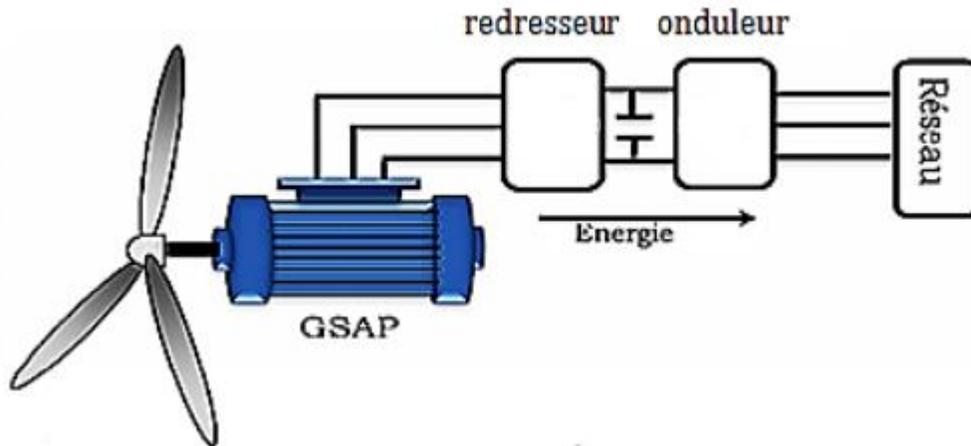


Figure II.5: Système éolien basé sur une GSAP [17]

- **Avantages [04]**

- Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesses.
- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles.
- Connexion de la machine facile à gérer.
- Elle est utilisée en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique).

- **Inconvénients [17]**

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants.
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.

II.2.3 Systèmes éoliens utilisant la machines à courant continu

Ce type de machines, présente une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais ces machines sont chères et moins robustes à cause de système balais-collecteur et ont un grand poids [17].

II.3 Types des structures des cascades

II.3.1 Structure de cascade basé sur la machine asynchrone

II.3.1.1 Machine asynchrone à double alimentation– structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

En remplaçant l'association redresseur - onduleur par un cyclo-convertisseur (Figure II.6), pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius » [07].

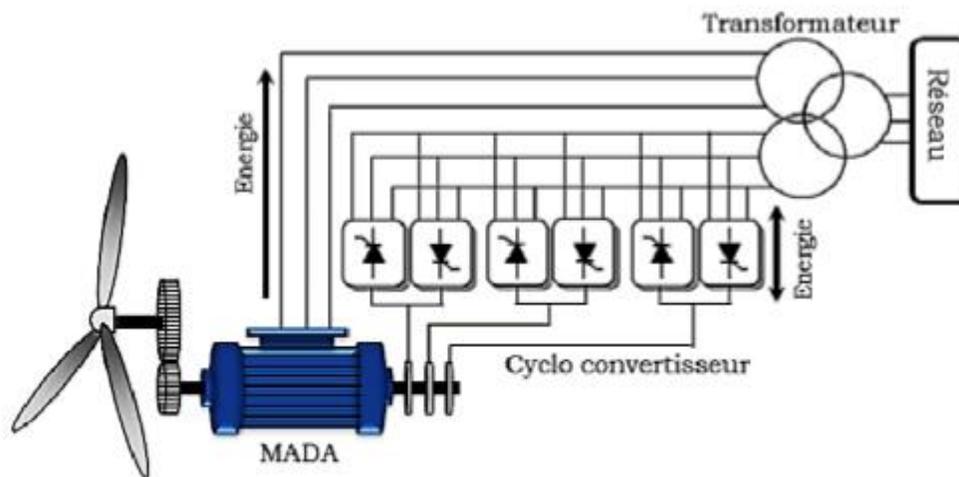


Figure II.6: Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur [07].

II.3.1.2 Structure Back-to-back

Ce choix de structure permet d'agir sur deux degrés de liberté, pour chaque convertisseur : un contrôle du flux magnétique et de la vitesse de la MADA, du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau [04].

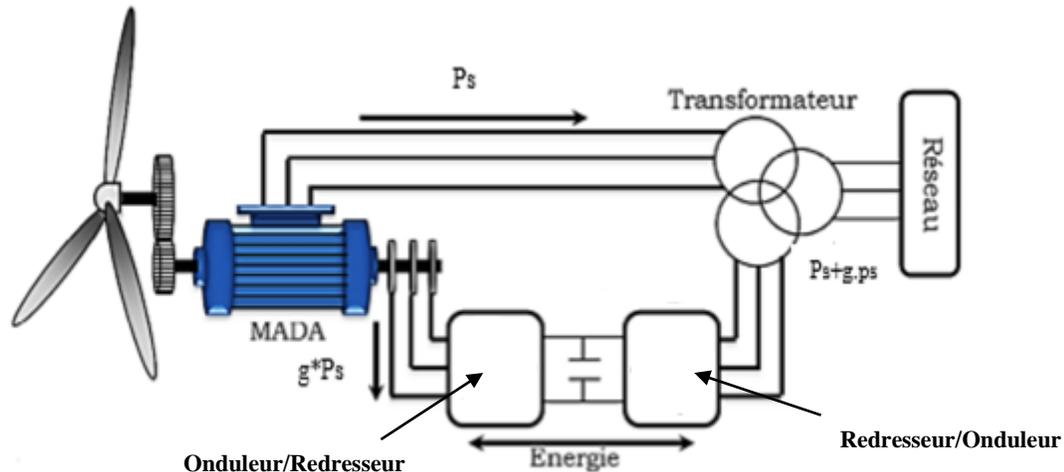


Figure II.7: MADA avec structure back-to-back [04]

Les avantages de cette cascade de convertisseurs sont les suivants [04] :

- Le flux d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Les limites de ce flux reposent sur la marge de variation de la vitesse de rotation. Celle-ci est imposée par les limites électriques et mécaniques du système.
- Le fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme est adéquat.
- Il y a une faible distorsion des tensions et courants rotoriques et des courants statoriques.
- Le contrôle du couple de la génératrice est indépendant de celui de la puissance réactive injectée par le rotor.

Cette configuration permet une variation de 100% de la vitesse du vent, en utilisant des pâles orientables. Les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour seulement 30% de la puissance nominale de la génératrice, donc les pertes dans les convertisseurs sont peu importantes [04].

II.3.2 Structure de cascade basé sur machine synchrone

II.3.2.1 Structure de cascade basé sur machine synchrone à aimant permanent

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante, dans les applications éoliennes isolées et autonomes (elle présente l'avantage d'avoir un bon rendement et

un bon couple massique), parce qu'elle a la particularité de la non nécessité d'avoir une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contre balancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures des machines synchrones à aimants permanents, alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent [18].

II.3.2.1.1 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie, dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale, de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T).

L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant, quelques limitations, ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure. II.8) [18].

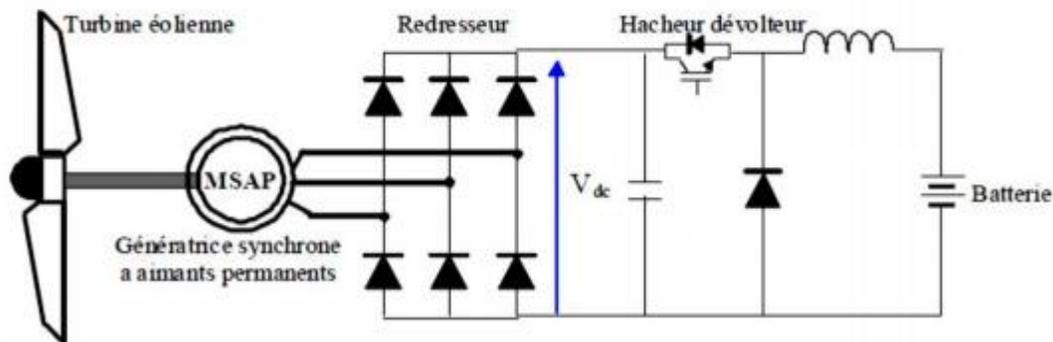


Figure II.8: Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur [18]

II.3.2.1.2 Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle, permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5, en commandant les deux interrupteurs T1 et T2.

Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement, mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées [18].

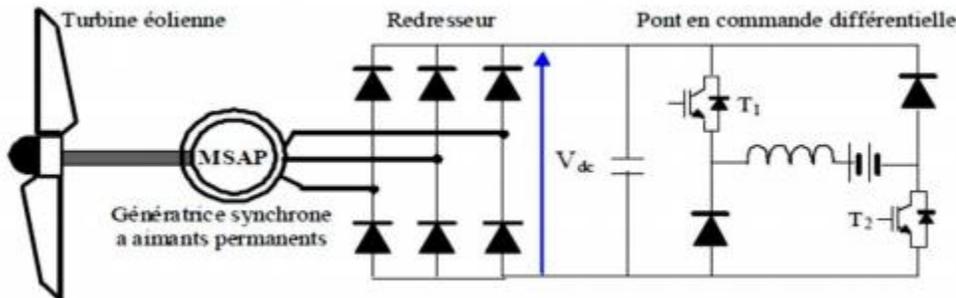


Figure II.9: Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont [18]

II.3.2.1.3 Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure II.10. Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est «naturel» mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue). Le schéma de principe est représenté par cette figure [18].

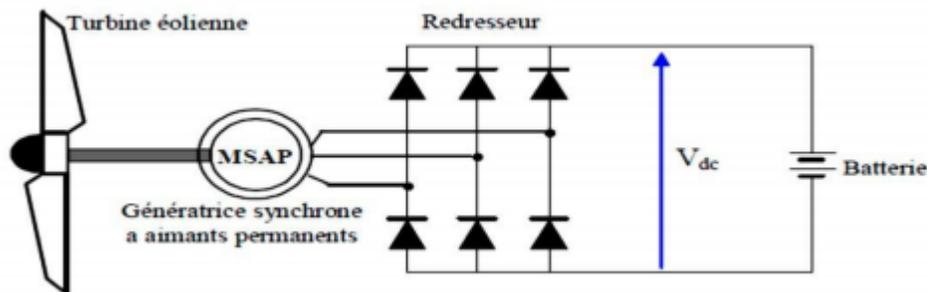


Figure II.10: Machine synchrone avec redresseur à diodes [18]

II.3.2.1.4 Structure avec redresseur à MLI

La configuration de référence est évidemment, celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure II.11, il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone, ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Par

contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position [19].

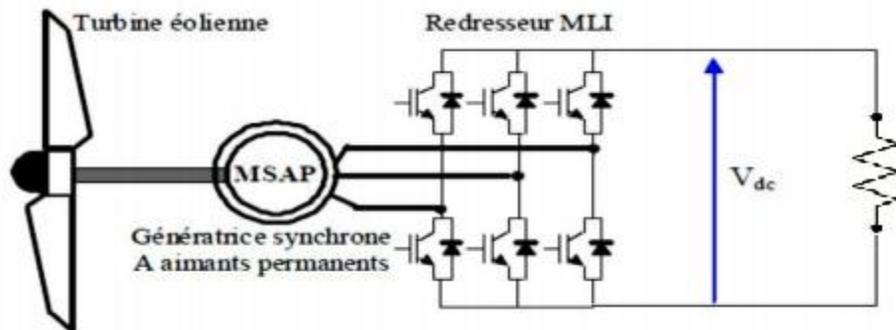


Figure II.11: Machine synchronisée connectée à un redresseur à MLI [19]

II.4 Choix de la cascade

Dans notre étude, nous avons choisi la structure de cascade basée sur machine synchronisée à aimants permanents avec redresseur à MLI (figure II.12).

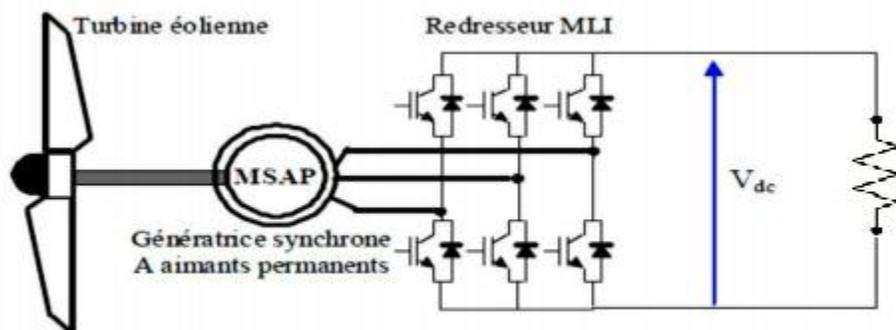


Figure II.12: Structure de cascade basée sur une MSAP avec redresseur à MLI [19]

II.5 Modélisation de la cascade

II.5.1 Modélisation de la vitesse du vent

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, a une variation aléatoire et une caractéristique très fluctuante. Alors, la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent.

Car, la puissance éolienne dans les conditions optimales, est proportionnelle à la vitesse du vent au cube. La vitesse du vent est tridimensionnelle [20]. La vitesse du vent (V_{vent}) peut-être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V_{vent}(t) = f(t) \quad (II.1)$$

Considérons le système éolien, à axe horizontal représenté sur la Figure (I.9) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_{vent} en amont de la turbine et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent, traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_{vent} et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_{vent} + V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement, de densité ρ , traversant la surface S des pales en un second est [21]:

$$m = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot (V_{vent} + V_2) \quad (II.2)$$

Avec :

m : La masse d'air [kg].

ρ : La densité de l'air [Kg/m³].

S : La surface circulaire balayée par la turbine [m²], $S = \pi \cdot R^2$.

V_{vent} : La vitesse du vent [m/s].

V_2 : La vitesse du vent en aval de la turbine.

D'après la seconde loi de Newton, la puissance extraite du vent s'exprime par:

$$P_v = \frac{1}{2} m \cdot (V_{vent}^2 - V_2^2) \quad (II.3)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans l'équation (II.3):

$$P_v = \frac{1}{4} \rho \cdot S \cdot (V_{vent} + V_2)(V_{vent}^2 - V_2^2) \quad (II.4)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S (figure II.13), sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_{vent} , la puissance P_{tur} correspondante serait alors :

$$P_{tur} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.5})$$

Le rapport entre la puissance extraite (disponible sur l'arbre mécanique) du vent P_{tur} et la puissance totale théoriquement P_v est alors:

$$\frac{P_{tur}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_{vent}}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_{vent}}{V_2}\right)^2\right) = C_p \quad (\text{II.6})$$

L'équation (II.6) peut s'écrire sous une autre forme:

$$C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \quad (\text{II.7})$$

Où:

C_p : Appelé coefficient de puissance.

λ : Représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent.

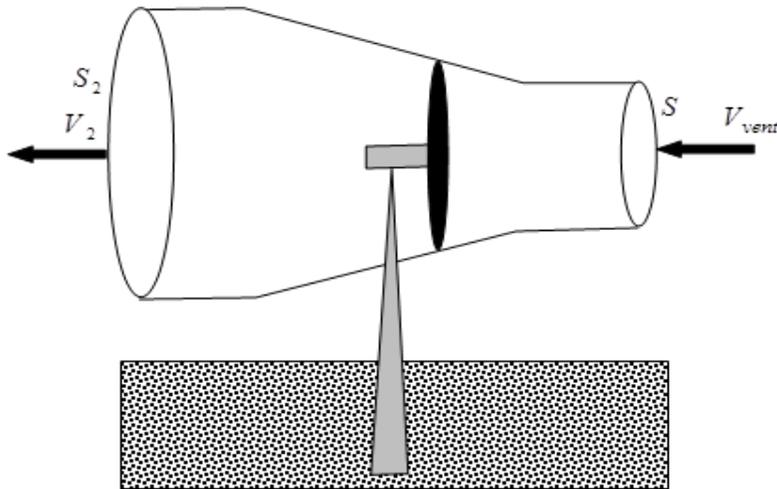


Figure II.13: Tube de courant autour d'une Éolienne [21]

II.5.2 Modélisation de la turbine éolienne

Considérons une turbine éolienne, munie de pales de longueur R , entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure. II.14) [22].

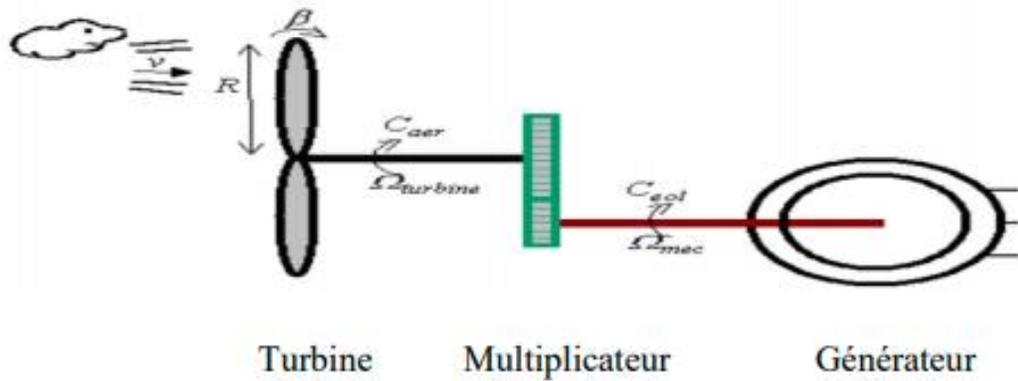


Figure II.14: Schéma de la turbine éolienne [22]

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple, qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor:

- La densité de l'air.
- La surface balayée par le rotor.
- La vitesse du vent.

La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés, réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [21]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.3 - 0.00167 \cdot \beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{10 - 0.3\beta} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot \beta \quad (\text{II.8})$$

La figure II.15 illustre l'évolution du coefficient de puissance de l'éolienne pour différents angles de décalage. Cette figure est caractérisée par le point optimal, qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance maximal et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée:

$$\lambda_{opt} = 4.9 \quad C_{p_{max}} = 0.3, \quad \beta = 0$$

Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini, comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pale $R\Omega_{tur}$ sur la vitesse instantanée du vent V_{vent} . Alors [23] :

$$\lambda = \frac{R\Omega_{tur}}{V_{vent}} \quad (\text{II.9})$$

Avec : Ω_{tur} est la vitesse angulaire de rotation de la turbine et R son rayon.

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne, peut s'écrire sous la forme:

$$P_{tur} = C_P P_{vent} = \frac{1}{2} C_P(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 V_{vent}^3 \quad (\text{II.10})$$

Tel que P_{vent} est la puissance de vent.

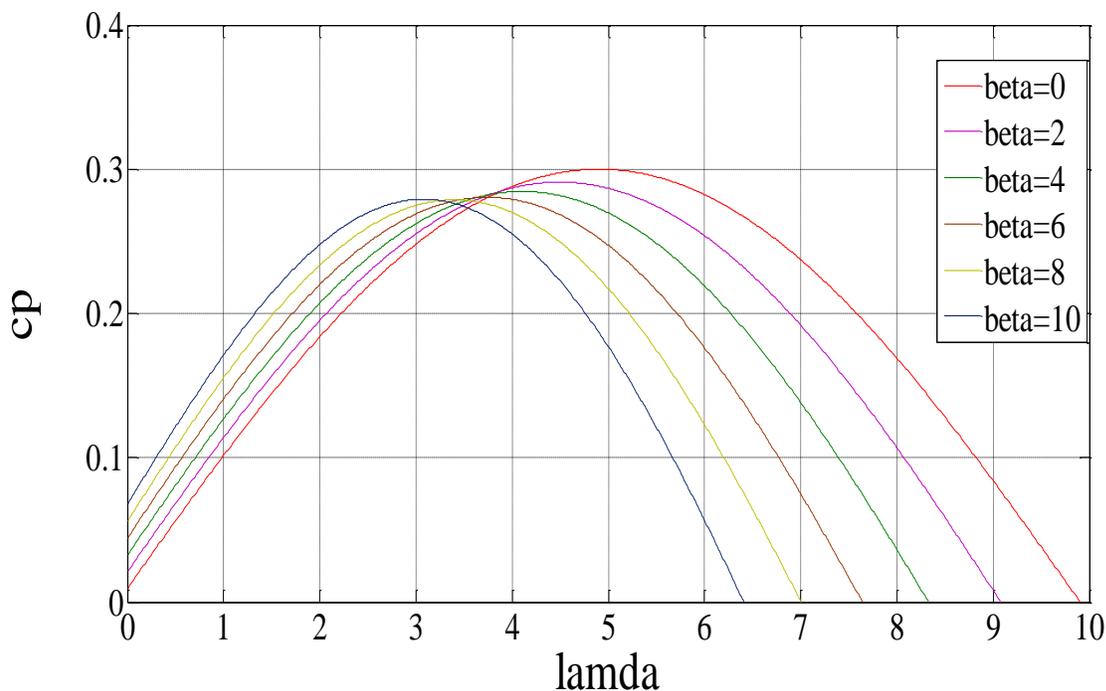


Figure II.15: Évolution du coefficient de puissance de l'éolienne pour différents angles de calage

En introduisant le rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique P_m , disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_{méc} R}{G V_{vent}} \right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.11})$$

Où : $\Omega_{méc}$ est la vitesse de rotation à la sortie du multiplicateur.

A partir de la puissance mécanique, le couple de la turbine est donc directement donné par:

$$C_{méc} = \frac{P_m}{\Omega_{tur}} = \frac{1}{2\Omega_{tur}} C_p(\lambda, \beta) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \quad (\text{II.12})$$

II.5.3 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement sont négligés. Les pertes énergétiques dans cet organe, sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante [22]:

$$\Omega_{tur} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (\text{II.13})$$

Le couple mécanique de la turbine éolienne est multiplié par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple de la turbine :

$$C_{tur} = G \cdot C_{méc} \quad (\text{II.14})$$

II.5.4 Modélisation de l'arbre

Les masses des différents éléments de la turbine, sont représentées par l'inertie $J_{turbine}$. Le modèle mécanique proposé, considère l'inertie totale J_T , constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale J_T est donnée par l'expression suivante [24]:

$$J_T = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{II.15})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet d'établir l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total $C_{méc}$ appliqué au rotor :

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \sum C = C_{méc} \quad (\text{II.16})$$

Le couple mécanique est en fonction du couple électromagnétique C_{em} , produit par la génératrice, du couple de frottements visqueux C_{vis} et du couple issu du multiplicateur C_{arbre} :

$$C_{méc} = C_{arbre} - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.17})$$

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante :

$$C_{vis} = f_v \Omega_{turbine} \quad (\text{II.18})$$

Avec : f_v le coefficient de frottement visqueux.

Après quelques manipulations des équations (II.15), (II.16) et (II.17), nous obtenons:

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} + f_v \Omega_{méc} = C_{arbre} - C_{em} \quad (II.19)$$

J_T : Inertie totale du système, ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine et de la génératrice.

II.5.5 Simulation de la turbine

Dans notre simulation de la turbine, nous avons proposé une période de 80 s et un profil de vent comme l'indique la figure (II.17). On utilise Matlab/Simulink pour faire cette simulation.

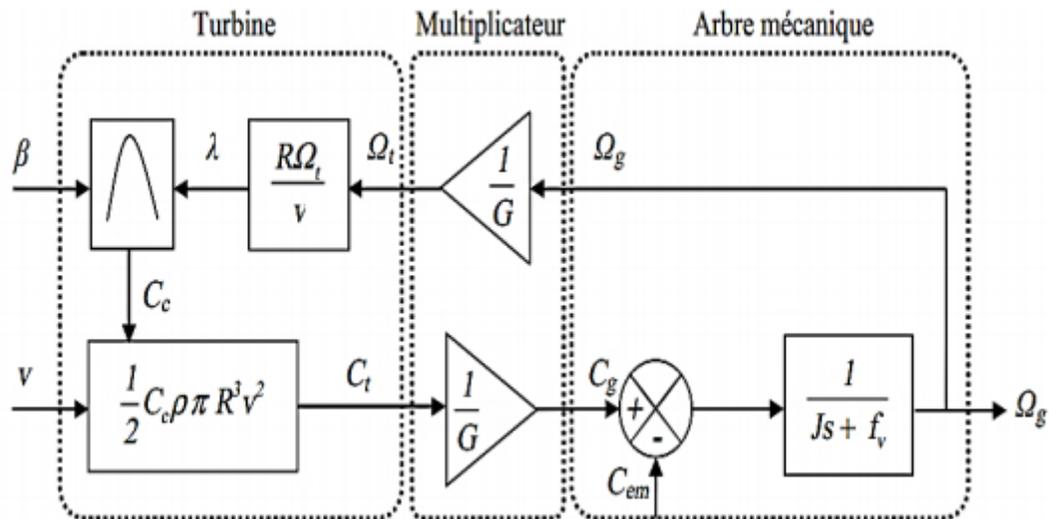


Figure II.16: Schéma bloc du modèle de la turbine [07]

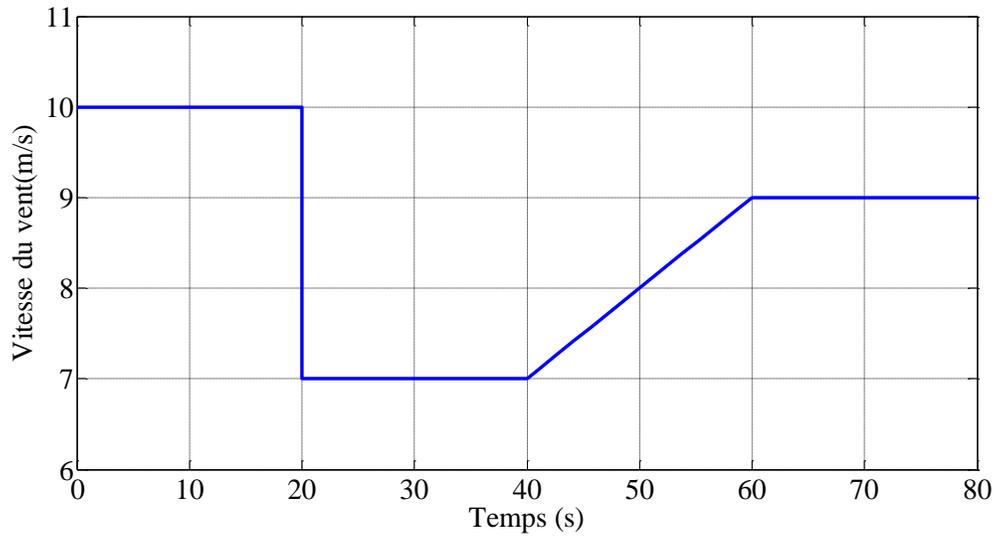


Figure II.17: Profile de Vitesse du vent

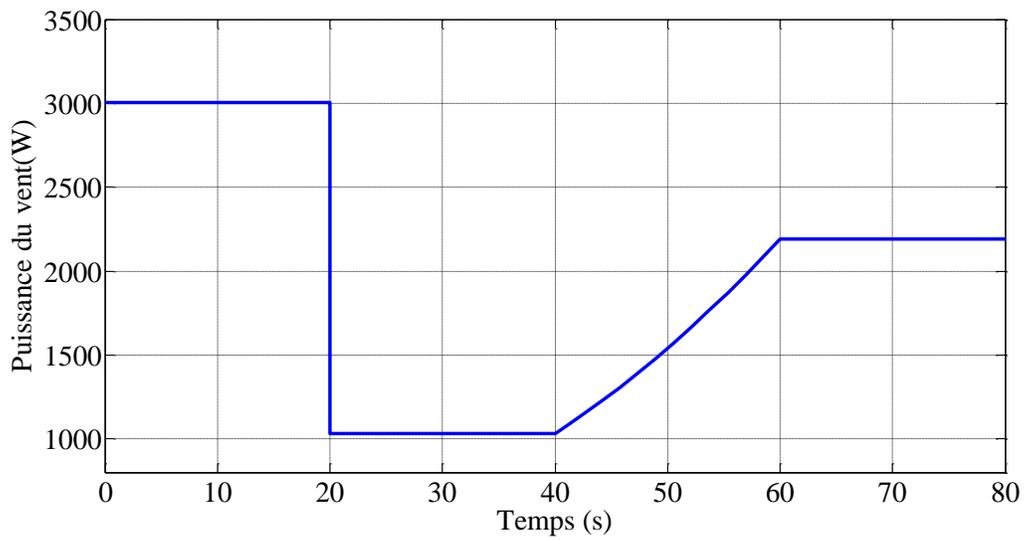


Figure II.18: Puissance du vent.

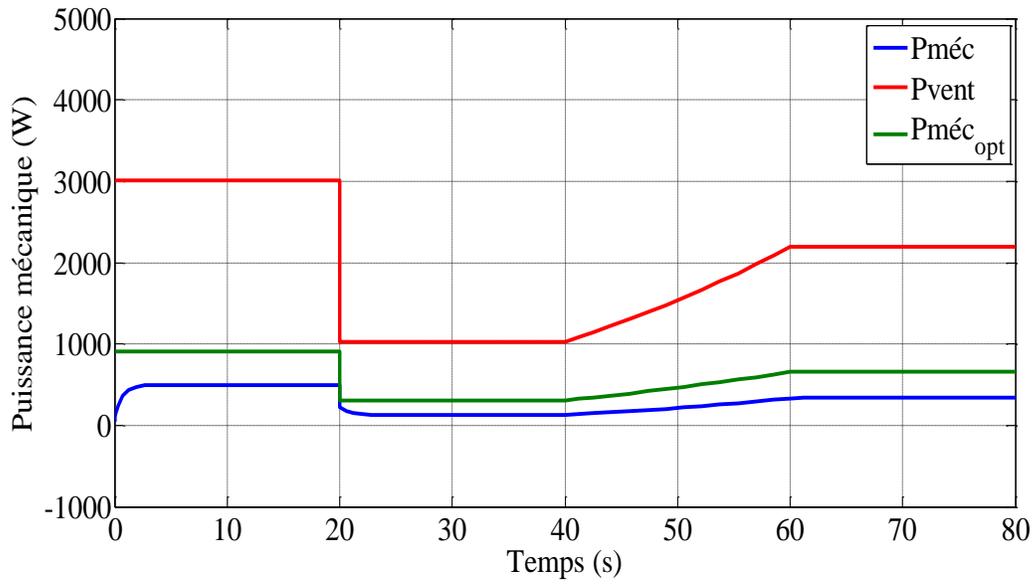


Figure II.19: Puissance mécanique

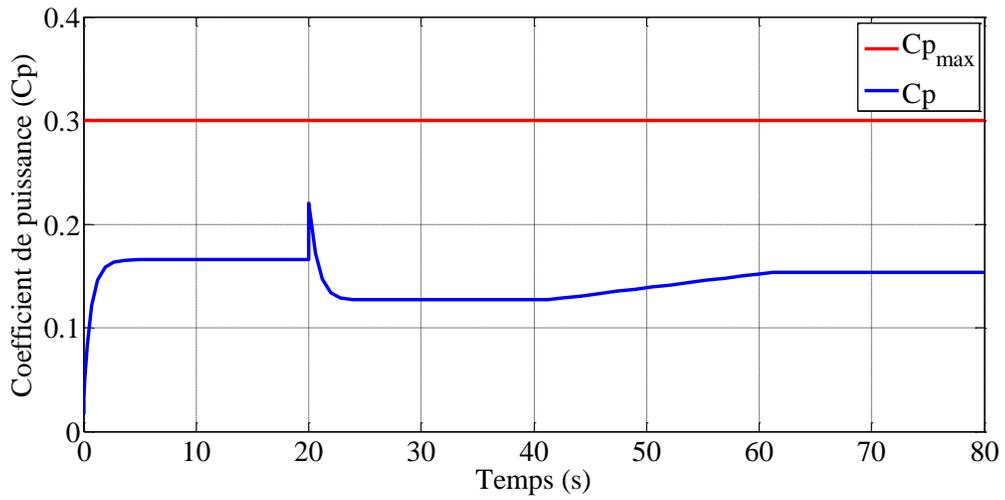


Figure II.20: Coefficient de puissance C_p

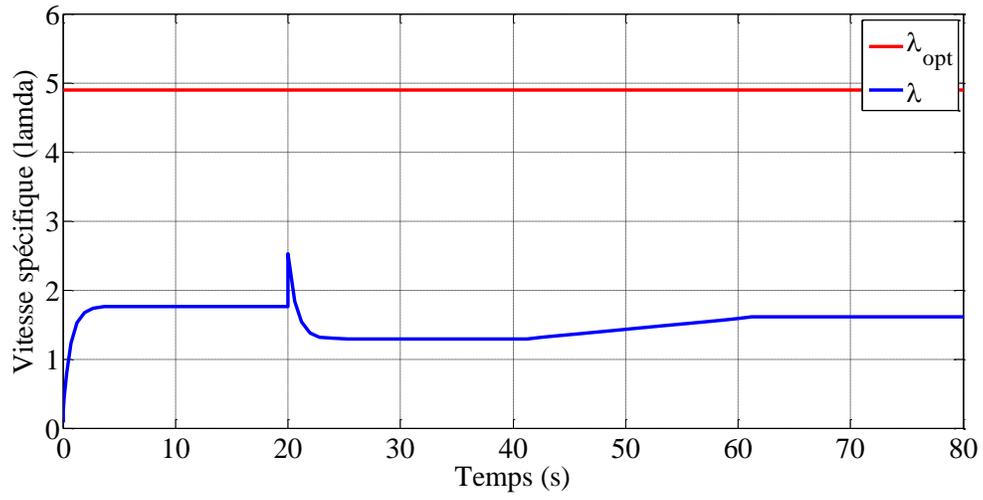


Figure II.21: La vitesse spécifique λ

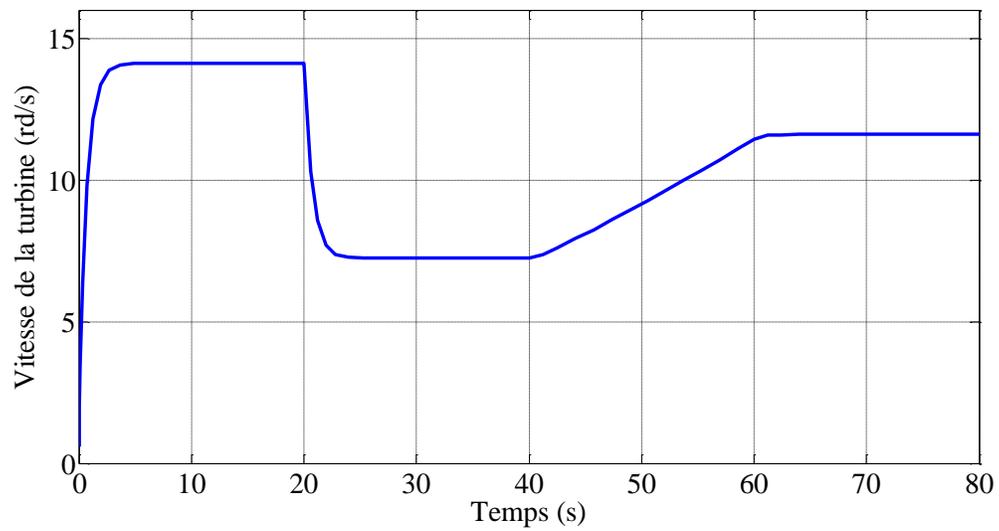


Figure II.22: La vitesse de la turbine

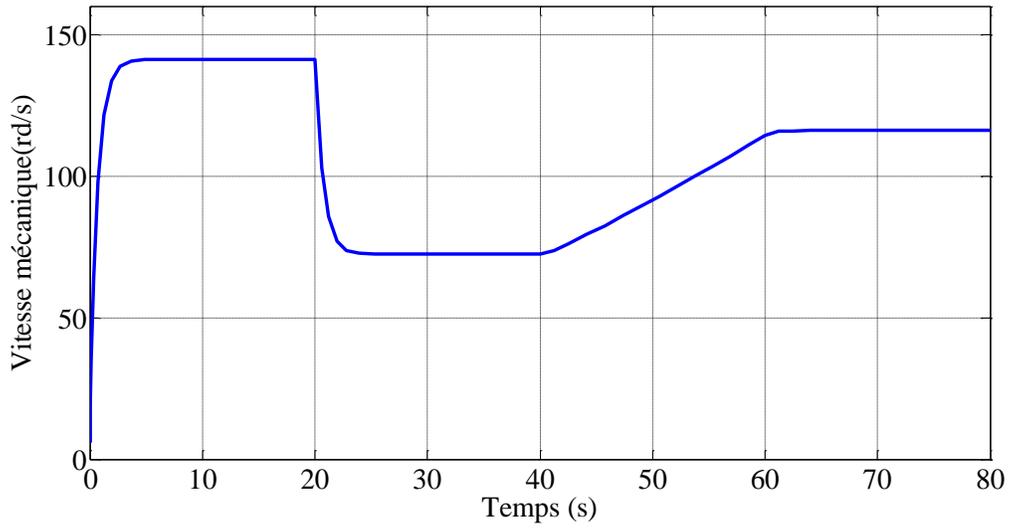


Figure II.23: La vitesse mécanique

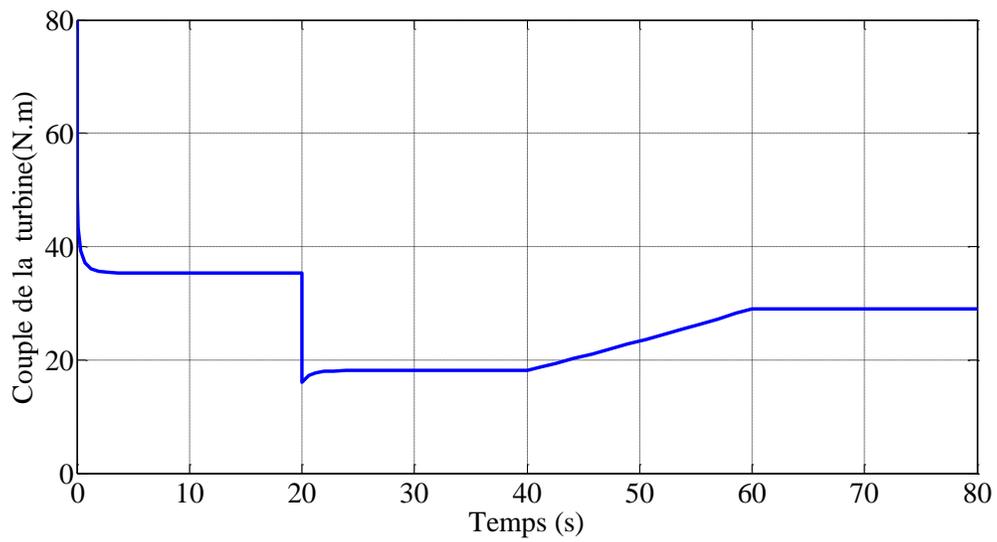


Figure II.24: Couple de la turbine

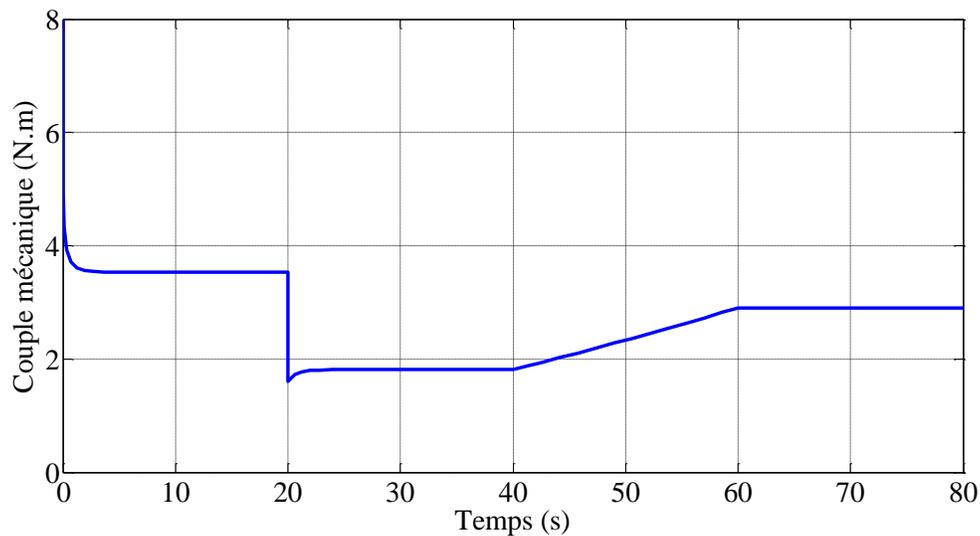


Figure II.25: Couple mécanique

Nous remarquons que dans cette simulation, la puissance n'est pas maximisée, ce qui exige un contrôle de la turbine afin de maximiser la puissance fournie par cette dernière, c'est la MPPT qui sera utilisée, dans le chapitre suivant.

II.5.6 Etude et modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

Une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte, au stator, un enroulement triphasé représenté par les trois axes déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique (Figure II.26) et au rotor, des aimants permanents assurant son excitation.

Le modèle de la machine synchrone possède quatre sorties de type électrique: les trois bornes des enroulements stator et une borne représentant le neutre. Les phases sont généralement connectées en étoile avec le neutre flottant, ce qui élimine les harmoniques d'ordre trois. Une sortie de type mécanique est prévue pour la connexion d'une charge c'est la représentation de l'arbre de la machine [17].

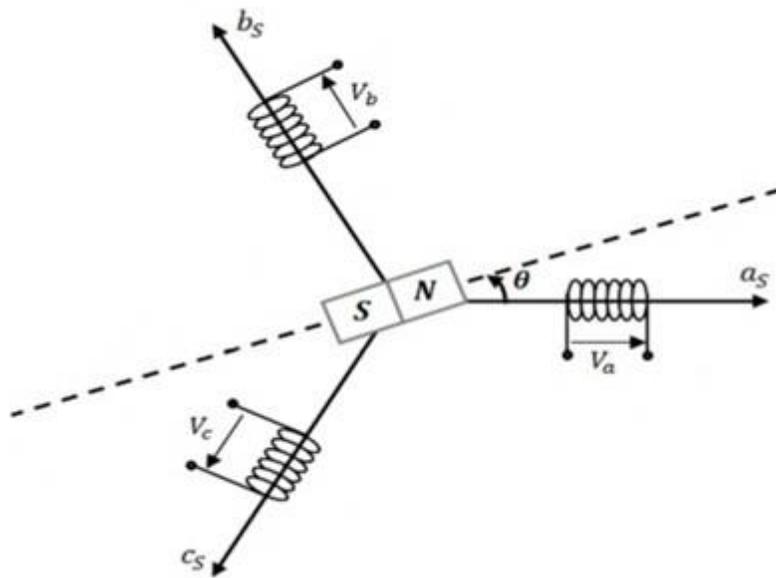


Figure II.26 : Représentation d'une MSAP dans le repère (abc) [17]

Nous utilisons les hypothèses simplificatrices suivantes [17]:

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

Nous distinguons trois types d'équations qui définissent le comportement de la machine à savoir, les équations électriques, les équations magnétiques et l'équation mécanique.

II.5.6.1 Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques, dans un repère fixe lié au stator sont décrites par ce système d'équations, sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [-R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Où :

v_a, v_b, v_c : Les tensions des phases statoriques.

i_a, i_b, i_c : Les courants de phases statoriques.

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Les flux totaux traversant les bobinages statoriques.

R_s : La résistance des phases statoriques.

$[v_a v_b v_c]^t$: Vecteur tensions statoriques.

$[i_a i_b i_c]^t$: Vecteur courants statoriques.

$[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^t$: Vecteur flux statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérés, sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

II.5.6.2 Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, nous appliquons un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure II.27).

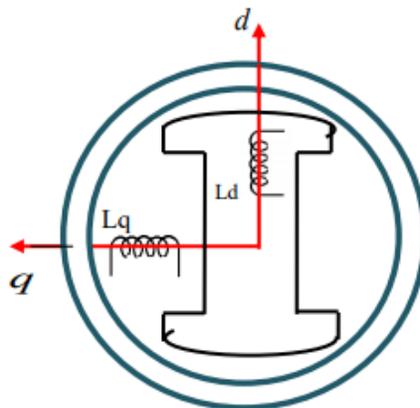


Figure II.27 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park [25]

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [26].

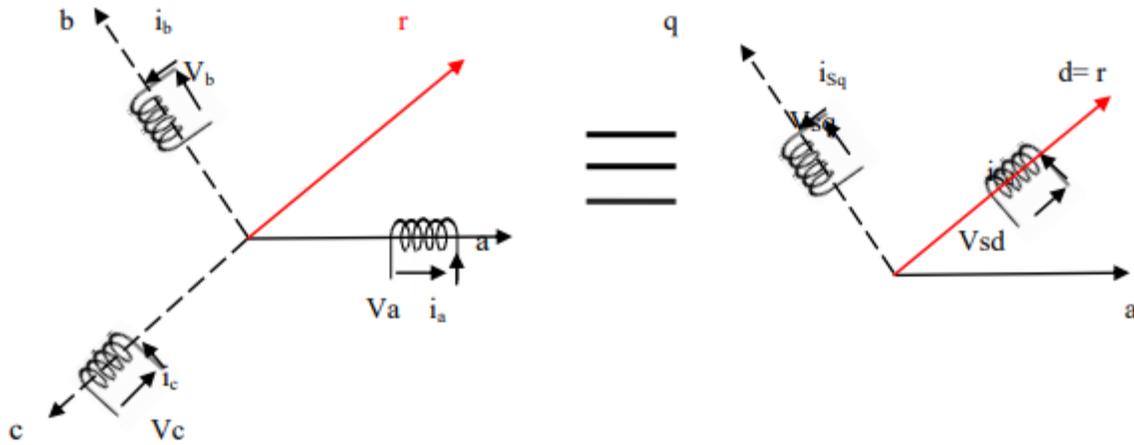


Figure II.28: Passage du repère naturel du stator au repère (d, q) de Park [25]

A l'aide de transformation de Park, nous passons de grandeurs réelles (v_a, v_b, v_c) et (i_a, i_b, i_c) à leurs composantes (v_0, v_b, v_c) et (i_0, i_b, i_c).

La matrice de Park s'exprime par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

La transformation inverse de Park est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Les équations électriques de la MSAP convention moteur sont données par :

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

En utilisant la convention génératrice, nous inversons le sens des courants i_d et i_q , dans les repères de Park (figure II.29), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} v_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega L_q i_q \\ v_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d + \omega \varphi_{sf} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

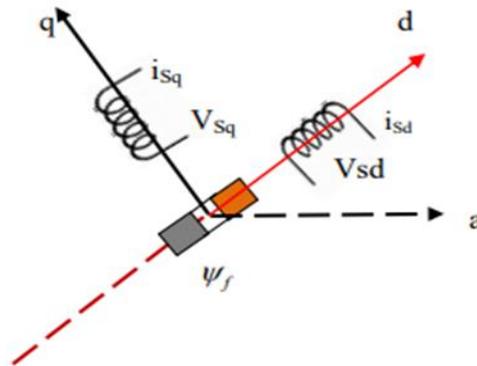


Figure II.29: Modèle de PARK pour la GSAP [09]

II.5.6.3 Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, φ_d et φ_q sont fonctions linéaires des courants i_d et i_q :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Où :

φ_d : Constante indiquant le champ dû à l'aimantation permanente du rotor.

L_d L_q : sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes.

φ_f : Représente le flux des aimants.

II.5.6.4 La puissance électromagnétique

Le couple électromécanique C_{em} est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les F_{mm} , dans l'entrefer généré par les courants statoriques [17].

Selon Park, l'expression de la puissance produite ou consommée est la suivante :

$$P_m(t) = \frac{3}{2}(V_d i_d + V_q i_q) \quad (\text{II.26})$$

En remplaçant V_d et V_q par leurs expressions nous aurons:

$$P_m(t) = \frac{3}{2} [R_s (i_d^2 + i_q^2) + \left(i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)] \quad (\text{II.27})$$

Avec :

➤ $R_s (i_d^2 + i_q^2)$: Représente la puissance dissipée, par pertes Joule dans les enroulements du stator .

➤ $\left(i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right)$: Indique la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements de stator .

➤ $\frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$: Indique la puissance électromagnétique.

II.5.6.5 Couple électromagnétique

Pour compléter le modèle électromécanique de la GSAP, nous devons ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique.

L'expression du couple électromagnétique [27] :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p[(L_q - L_d)i_d i_q - \varphi_{sf}i_q] \quad (\text{II.28})$$

Avec : p est le nombre de paires de poles.

Si nous choisissons le rotor à pôles lisses ($L_q = L_d$), l'équation précédente devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p \varphi_{sf}i_q \quad (\text{II.29})$$

II.5.6.6 Equation mécanique

L'équation mécanique est exprimée par cette équation [17] :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} + f\Omega_{em} = C_{em} - C_r \quad (\text{II.30})$$

C_r Etant le couple résistant.

En combinant les équations (II.24), (II.28) et (II.30), nous pouvons écrire la représentation sous la forme d'équation d'état suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\Omega_g}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d}i_d + \omega \frac{L_q}{L_d}i_q \\ -\frac{R_s}{L_q}i_q - \omega \frac{L_d}{L_q}i_d - \omega \frac{\varphi_f}{L_q} \\ \frac{3}{2} \frac{P\varphi_f}{J}i_q - \frac{P(L_q-L_d)}{J}i_d i_q - \frac{f}{J}\Omega_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ C_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

II.5.6.7 Simulation de la GSAP

Dans toutes les simulations on a utilisé le logiciel (Matlab/simulink), nous avons utilisé les paramètres suivants [28]:

$$R_s = 1.4 \Omega; L_d = 0.0263 \text{ H}; L_q = 0.0263 \text{ H}; J = 0.01 K_g \cdot m^2; P = 4; \varphi_f = 0.15 \text{ Wb}; f = 0.06$$

Les différents variables sont représentés par les figures suivantes :

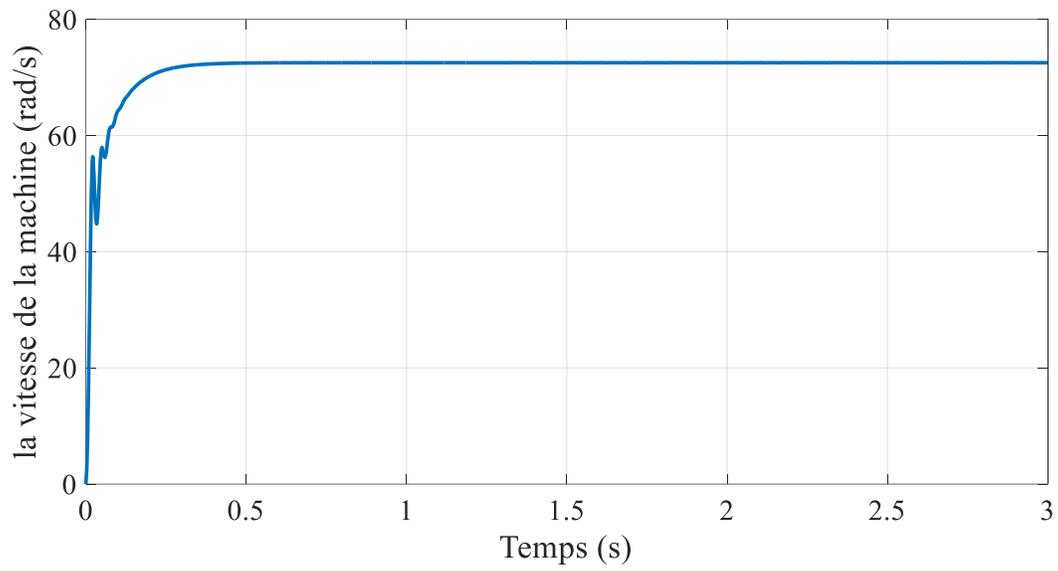


Figure II.30: La vitesse de la machine

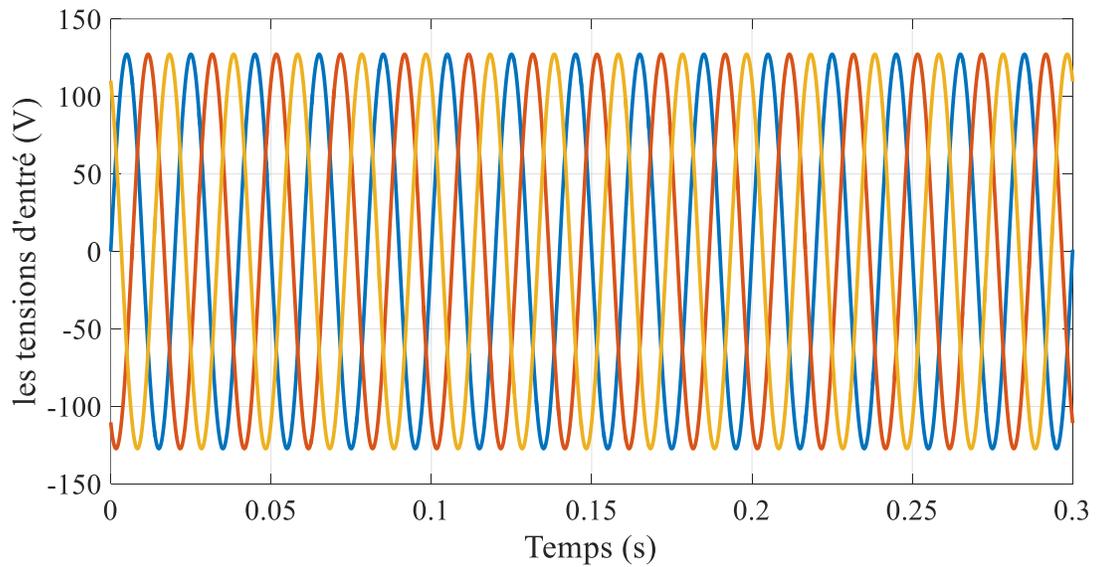


Figure II.31: Les tensions V_{abc} .

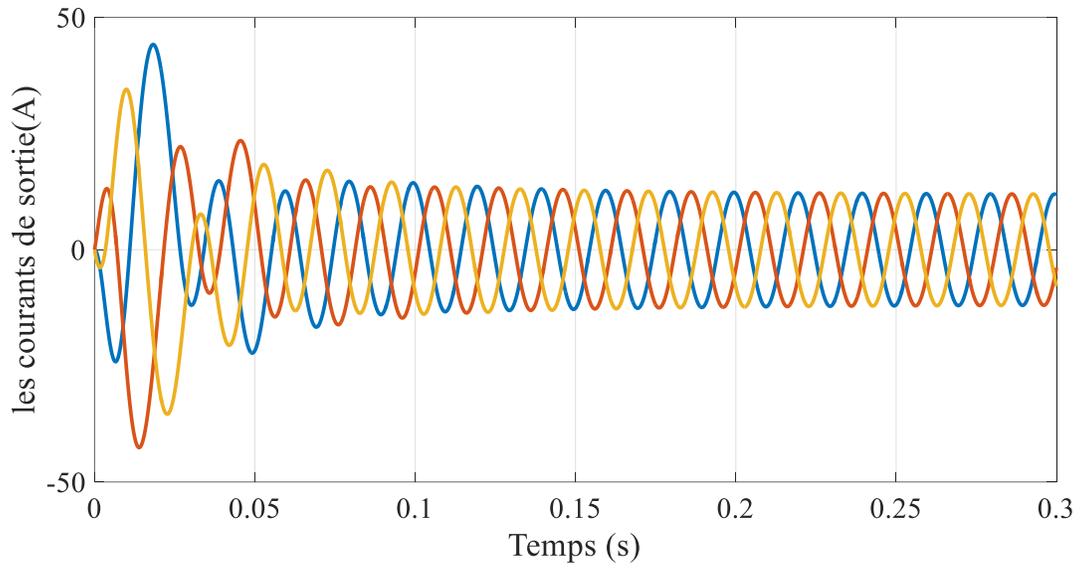


Figure II.32: Les courants I_{abc}

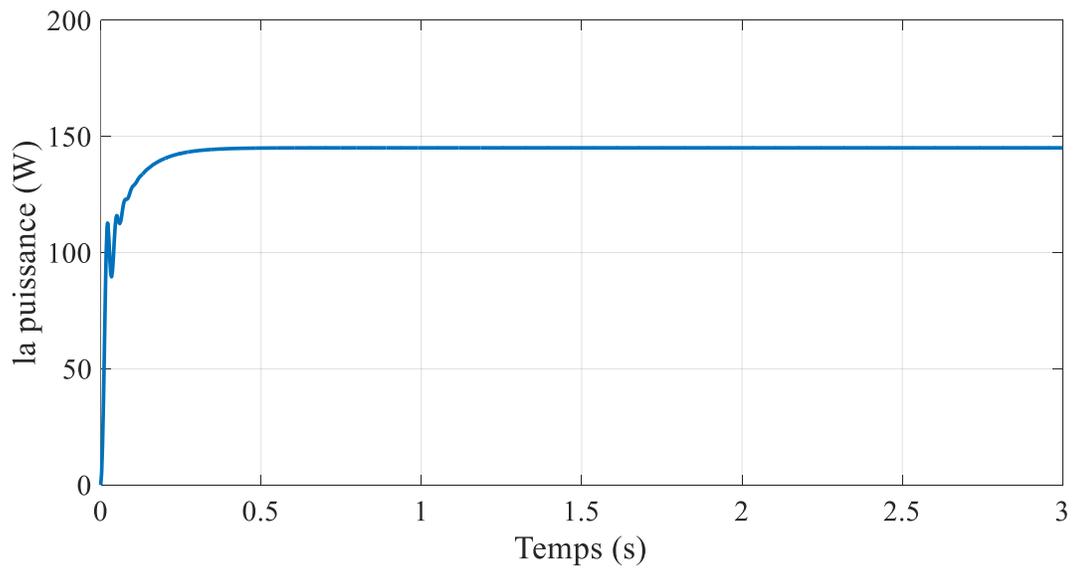


Figure II.33: La puissance de la génératrice

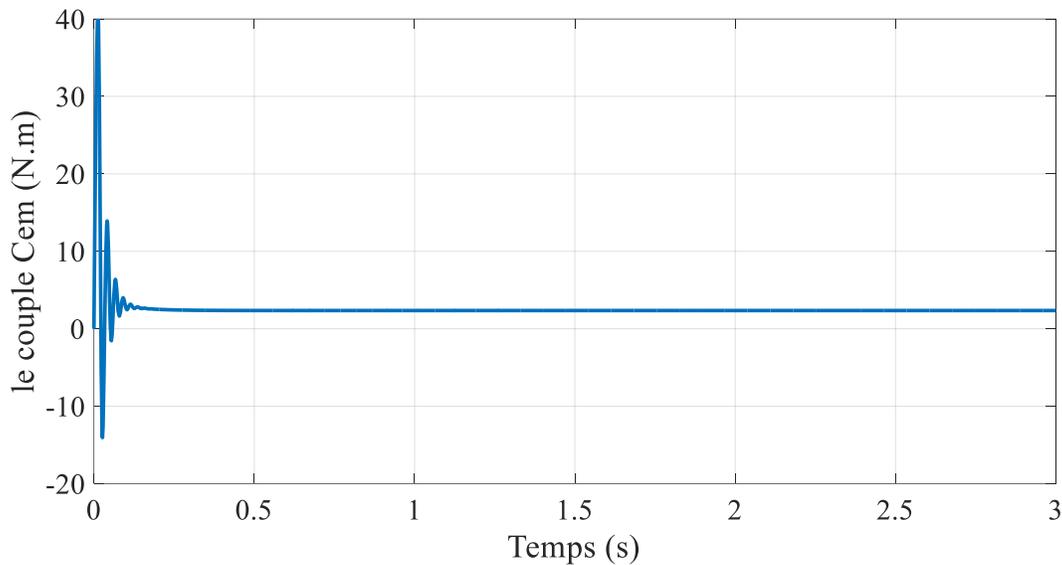


Figure II.34: Le couple électromagnétique

II.5.7 Modélisation des convertisseurs statiques

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI - charge), nous nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine.

Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, nous modélisons le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant et résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour le modèle dynamique du système, nous allons diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le côté continu.

Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu, ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [29] [30]:

- Ils permettent un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée, à partir des interrupteurs qui sont bidirectionnels.
- Génèrent moins ou pas de perturbations électriques par propagation de courant harmonique.

➤ ils peuvent contrôler les grandeurs électromécaniques, telles que le couple électromagnétique ou la vitesse de rotation de la machine électrique.

II.5.7.1 Modélisation des redresseurs

Les redresseurs sont des onduleurs utilisés « à l'envers » qui permettent de produire une tension continue à partir d'une source alternative. La figure (II.35) représente le schéma d'un redresseur [17].

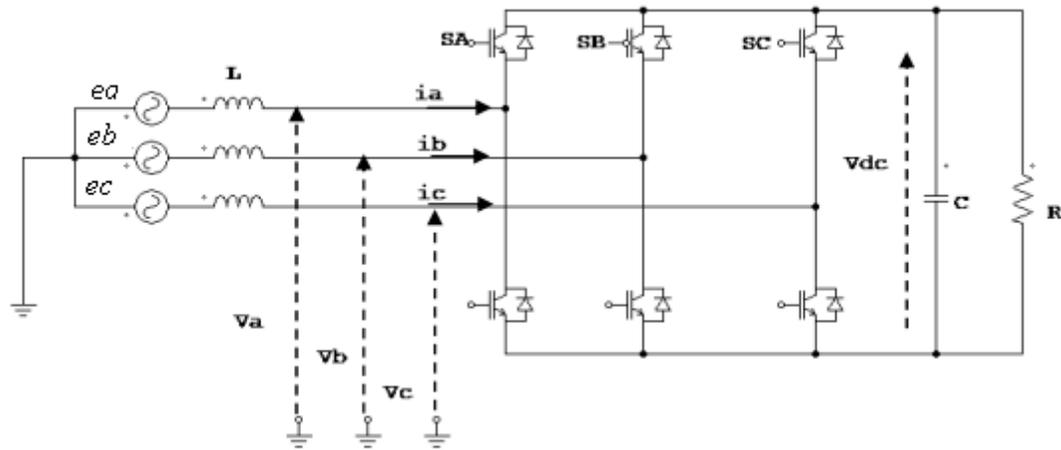


Figure II.35: Redresseur MLI [17]

Les interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [28] :

$$S_j = \begin{cases} +1; S'_{j=-1} \\ -1; S'_{j=+1} \end{cases} \text{ pour } j = a, b, c \quad (\text{II.32})$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de S_j , V_{dc} et les courants d'entrées i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} .

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (\text{II.33})$$

Les tensions d'entrée entres phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} U_{Sab} = (S_a - S_b)V_{dc} \\ U_{Sbc} = (S_b - S_c)V_{dc} \\ U_{Sca} = (S_c - S_a)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Sab} \\ U_{Sbc} \\ U_{Sca} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$\begin{cases} U_{sa} = \frac{2S_a + S_b + S_c}{3} V_{dc} \\ U_{sb} = \frac{2S_b + S_a + S_c}{3} V_{dc} \\ U_{sc} = \frac{2S_c + S_a + S_b}{3} V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_c) = \frac{1}{C} [i_{dc} - i_{ch}] \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$i_{ch} = \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II.38})$$

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{II.39})$$

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressé.

C : La capacité.

i_{ch} : Courant de la charge.

R_{ch} : Résistance de la charge.

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs.

II.5.7.2 La commande MLI

Le principe de la commande à modulation de largeur d'impulsions sinus-triangle consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (figure II.36) [31].

L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.40})$$

Le taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (V_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (\text{II.41})$$

II.5.7.3 Algorithme de la commande

L'algorithme de commande de la stratégie sinus-triangle peut être résumé en:

$$\begin{cases} V_{ref1} > V_p \Rightarrow s_a = 1 \\ V_{ref1} < V_p \Rightarrow s_a = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ref2} > V_p \Rightarrow s_b = 1 \\ V_{ref2} < V_p \Rightarrow s_b = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ref3} > V_p \Rightarrow s_c = 1 \\ V_{ref3} < V_p \Rightarrow s_c = 0 \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Les paramètres utilisés dans cette commande sont : $m = 6$; $r = 0.8$

Nous supposons des signaux d'entrée comme références (figure II.39), pour faire la simulation du bloc redresseur.

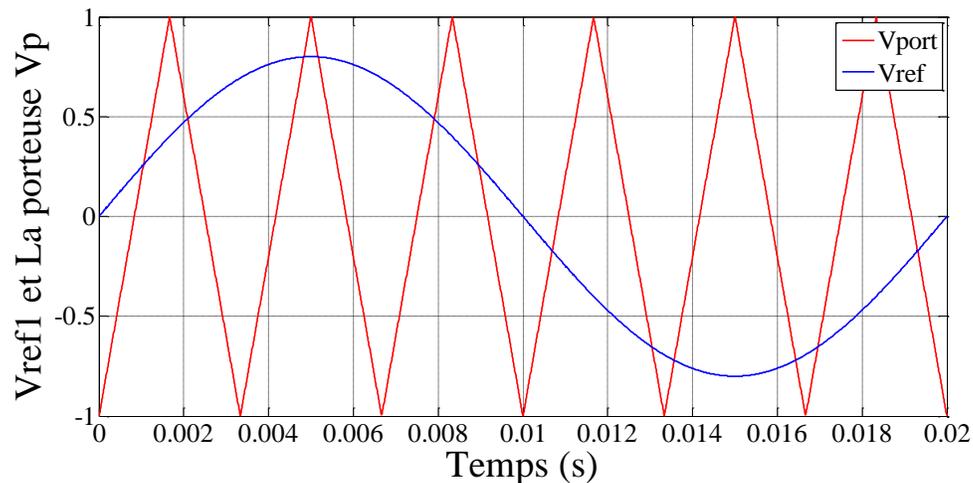


Figure II.36: Comparaison de la porteuse et la référence sinusoïdale

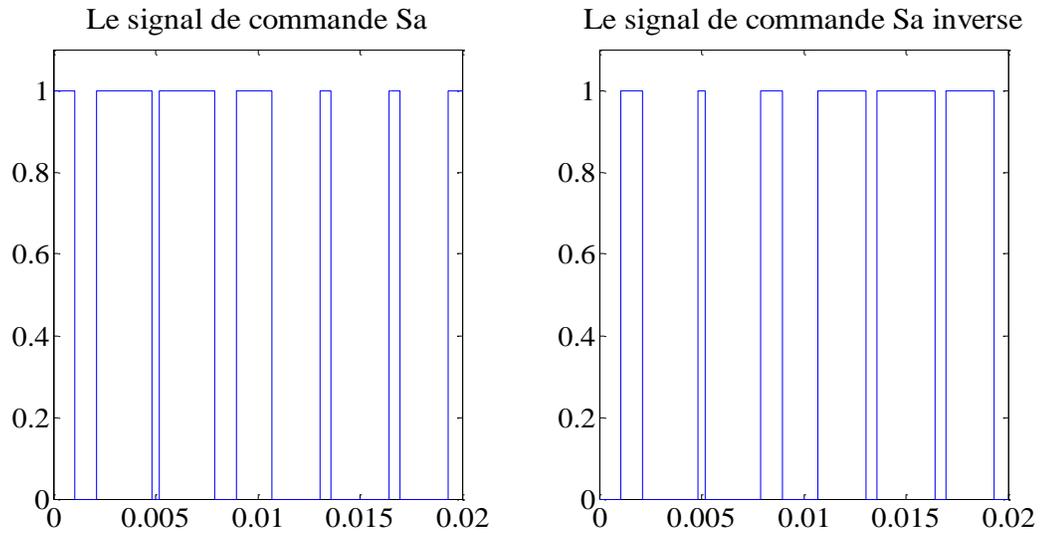


Figure II.37: Le signal de commande Sa et Sa inverse.

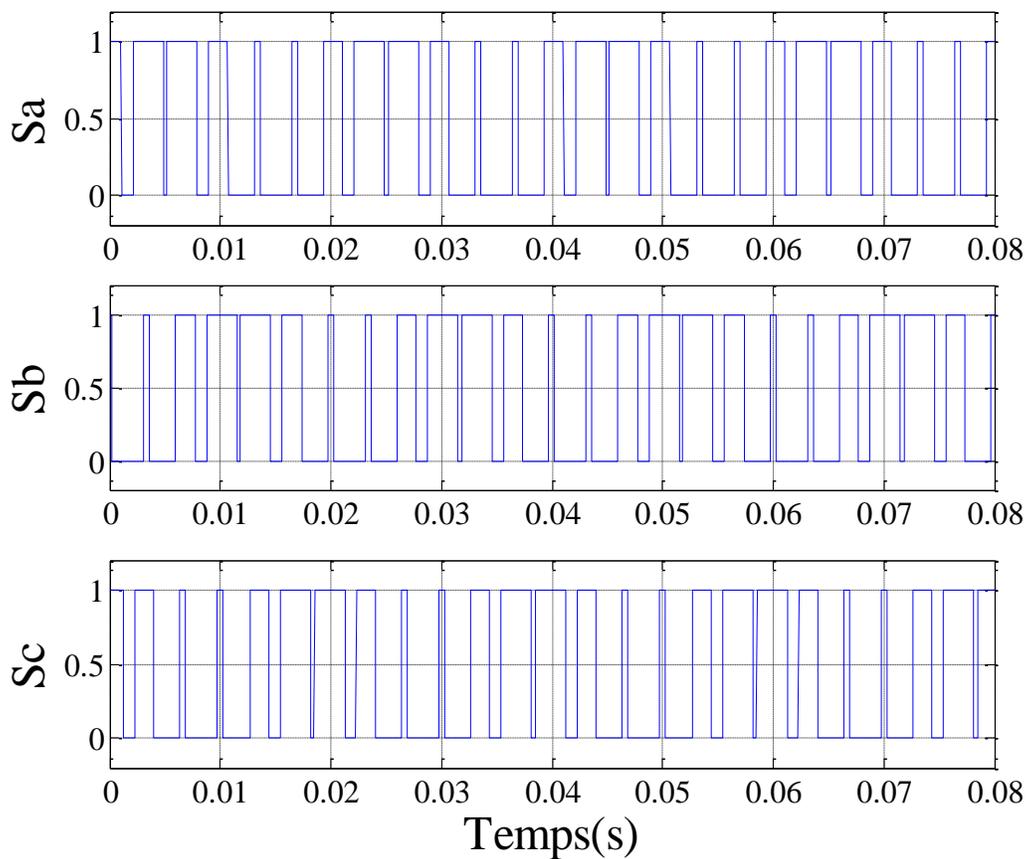


Figure II.38: Les signaux de commande

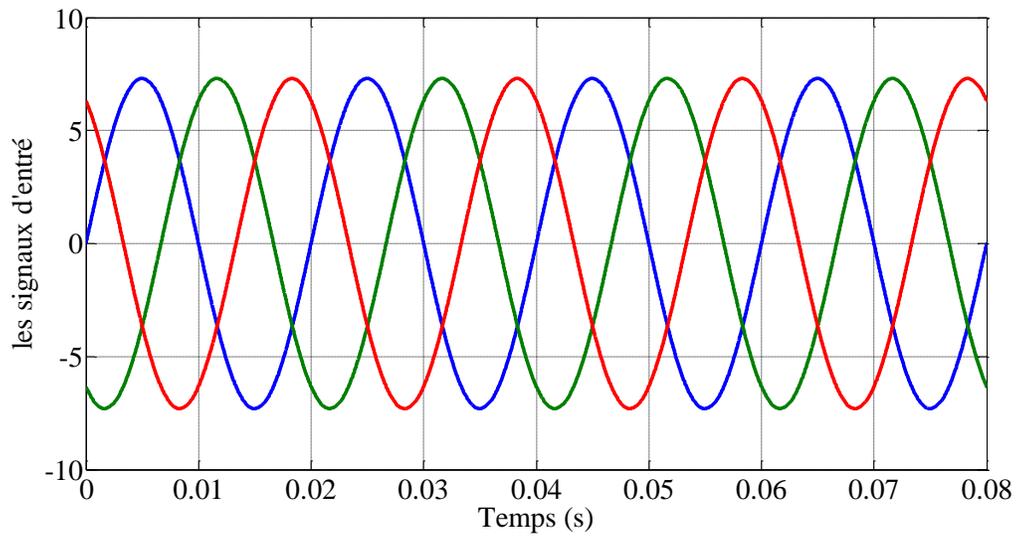


Figure II.39: Les signaux de références

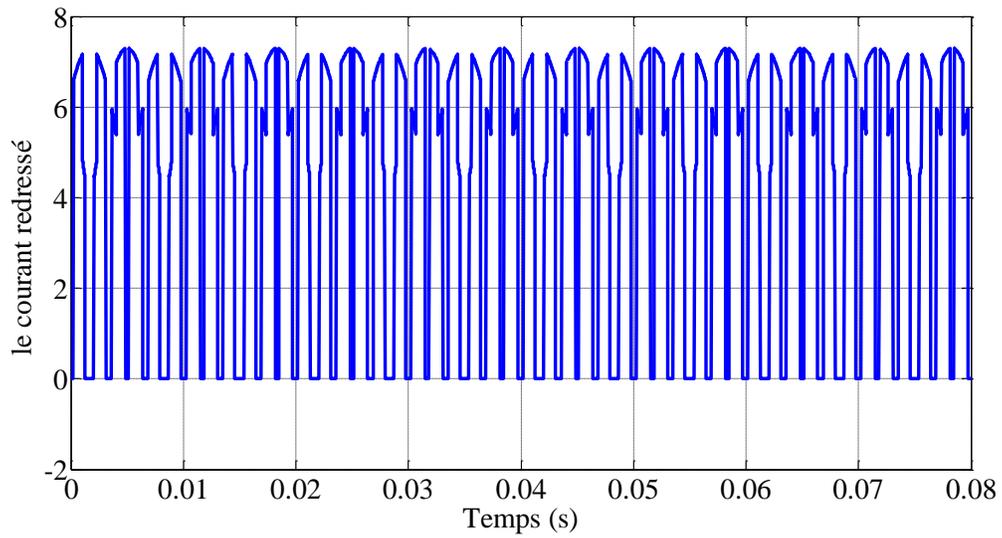
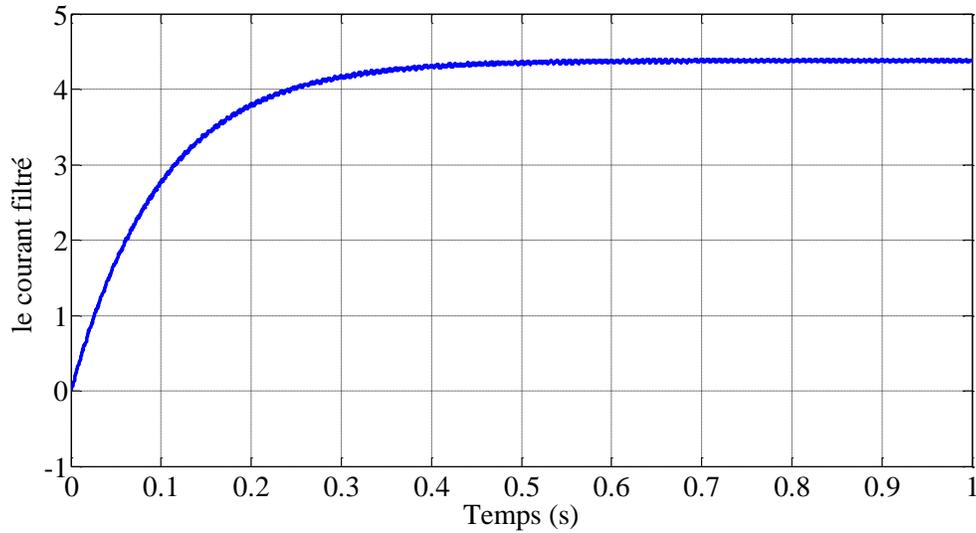
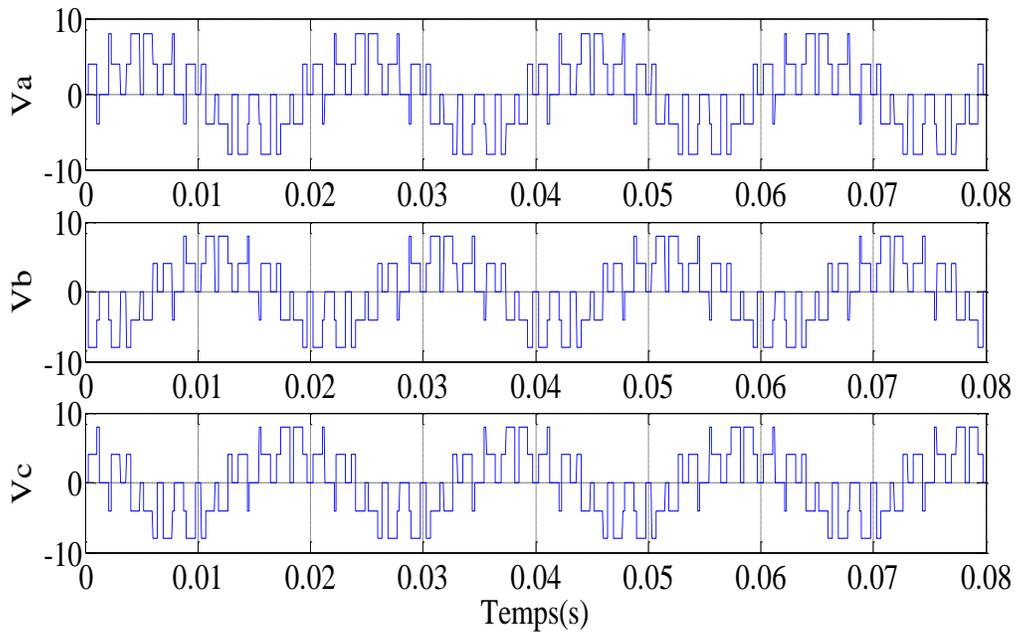


Figure II.40: Le courant redressé

**Figure II.41:** Le courant redressé et filtré**Figure II.42:** Les tensions de l'entrée du redresseur

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éoliennes utilisant les machines asynchrones, les machines synchrones et les machines à courant continu, comme nous avons donné les avantages et les inconvénients de chaque type.

Nous avons noté les types des structures des cascades et nous avons présenté la cascade choisit pour notre étude. Nous avons décrit la modélisation du système de conversion éolienne (vent, turbine, GSAP, redresseur). Nous constatons que le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents est un système à équations différentielles, nous avons utilisé la transformation de Park pour simplifier ce modèle, et nous avons présenté les résultats de la simulation de GSAP, turbine et redresseur.

Ce chapitre est une partie essentielle qui va nous diriger vers l'étude de l'association de ces systèmes pour former une cascade destiné à la production de l'énergie électrique. Les techniques de commande de la cascade de conversion ainsi les techniques de maximisation de puissance seront étudiées dans le chapitre suivant.

III.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre c'est l'étude de l'association du système Eolien. Après avoir modélisé et simulé les éléments de la Cascade étudiée, élément par élément, on va essayer de faire une association en série des éléments suivants : Eolienne, machine synchrone à aimant permanent, groupe convertisseur (qui est un redresseur triphasé, commandé et à deux niveau). A la fin de cette cascade nous avons inséré une charge. Dans ce chapitre nous avons introduit un profile de vent très proche de la réalisée dans l'objectif de suivre l'évolution de la puissance extraite et transmise d'un système à un autre. Il est important de noter que dans ce cas de systèmes (en Boucle ouverte et sans commande) la puissance de sortie ne sera pas optimales est une étude de commande sera nécessaire [32], [21]. Dans la littérature, ils existent beaucoup de techniques de commande dédiées à la maximisation de la puissance extraite [26], [33]. Dans ce chapitre, nous avons fait une recherche bibliographique pour donner quelque loi de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), de plus nous avons choisis et détaillé une loi de commande MPPT. Mais comme tout travail de mémoire, notre travail non exhaustif est toujours ouvert et nécessite une suite. Que nous souhaitons, dans le sens de maximisation de puissance.

III.2 L'association du système éolien

Comme nous avons déjà dit, la cascade étudiée est composée de turbine, machine synchrone à aimant permanent, redresseur. Il est très intéressant de voir et vérifier tous les grandeurs du système complet, en commençant par les grandeurs physiques liées à la modélisation du vent, les grandeurs mécanique de la turbine, ensuite, les grandeurs mécanique, électromagnétique et électrique de l'association machine-convertisseur. Mais le plus important dans tout ça est de suivre l'évolution des puissances de l'éolienne jusqu'à la charge.

La figure suivante montre la cascade étudié, et surtout, montre la nature de chaque puissance qui correspond à chaque élément et les différentes transformations qui l'a subit. Encore une fois, il est important de voire ces quantités de puissance à travers une simulation en boucle ouverte de tout le système.

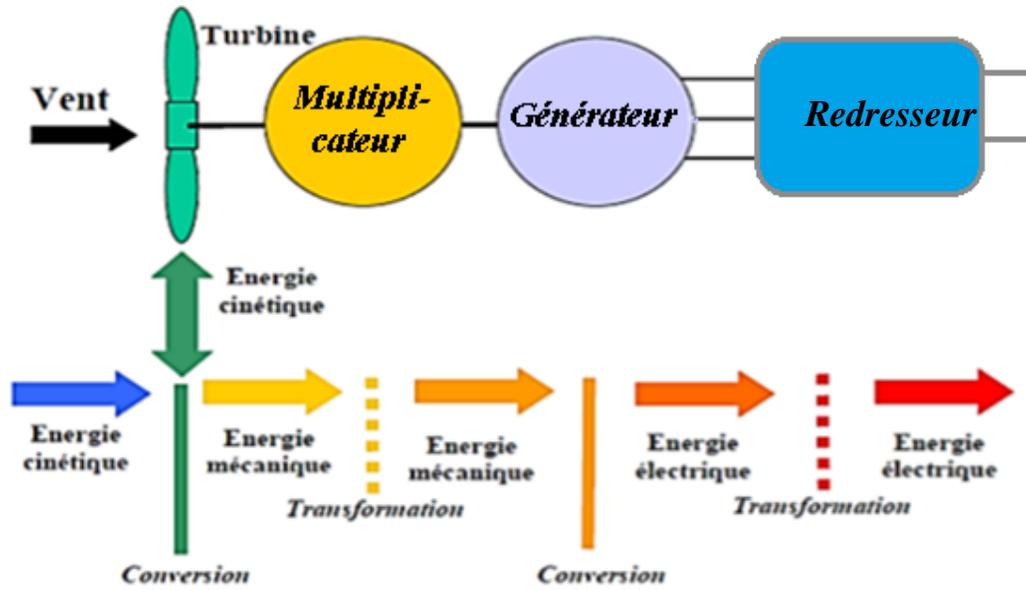


Figure III.1: structure de la cascade étudiée.

Comme dans le chapitre précédent, où, nous avons réalisé une simulation des différents systèmes, On utilise Matlab/Simulink pour toutes les simulations. Ces paramètres sont donnés dans les deux tableaux suivants [28].

➤ profile du vent

Dans ce chapitre, nous avons introduit la fonction III.1 qui génère un profil du vent très proche de la réalité, au moins dans notre avis. L'expression est la suivante :

$$V_{vent}(t) = 6.31 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.293t) + 0.2\sin(3.66645t) \quad (III.1)$$

➤ Paramètres de la turbine éolienne :

Paramètres	Valeur
Rayon de la turbine	1.25 m
Air densité	$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^2$
L'angle de calage	0°
Le rapport de multiplicateur	G=10
Inertie de la turbine	$J_{tur} = 0.015 \text{ [Kg. m}^2\text{]}$
Coefficient de frottement visqueux total	$f_v=0.025$

➤ Paramètres du redresseur :

Paramètres	Valeur
La résistance de charge	$R_{ch} = 7 [\Omega]$

III.2.1 Les résultats de simulation

Une simulation de la cascade a été effectuée en utilisant le modèle du vent montré sur la (Figure III.2) suivante. Les résultats obtenus sont tous donnés en suite.

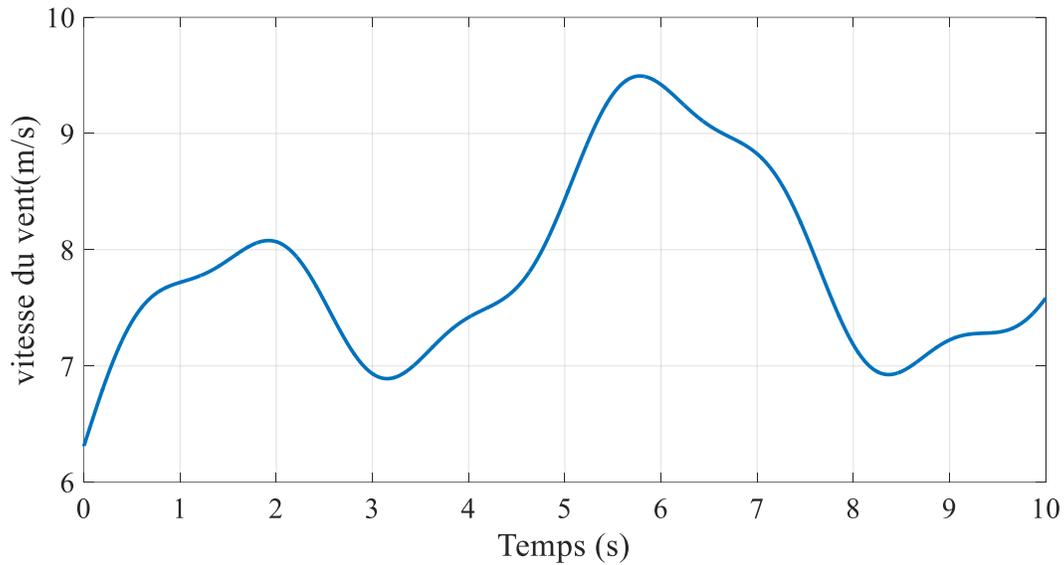


Figure III.2: Un profil de la vitesse du vent.

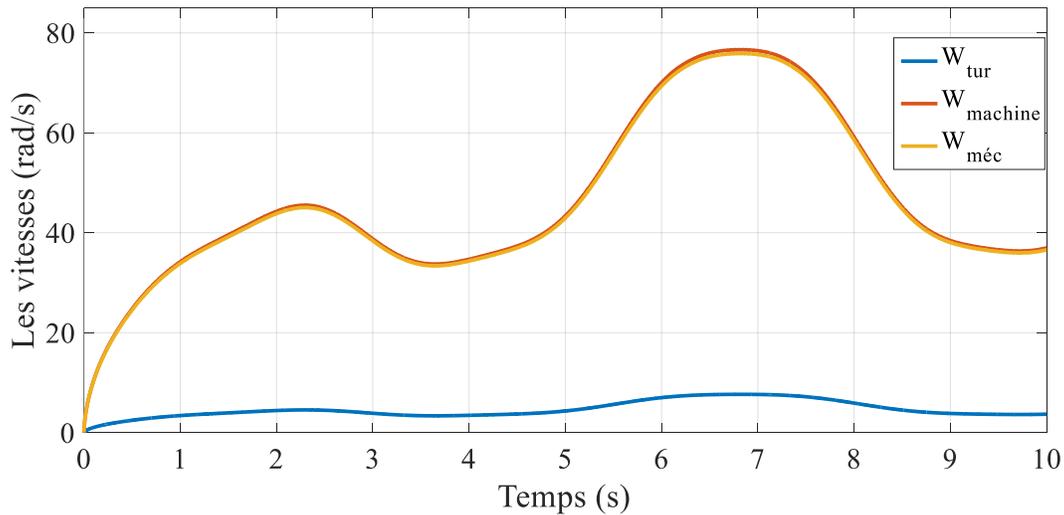


Figure III.3: Les différentes vitesses.

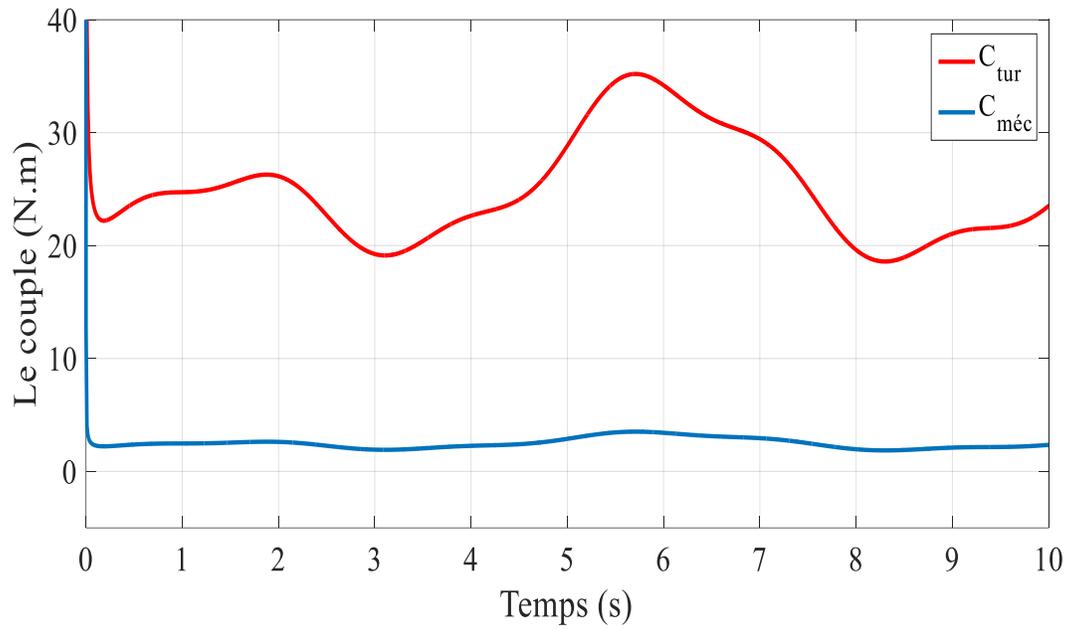


Figure III.4: Les différents couples.

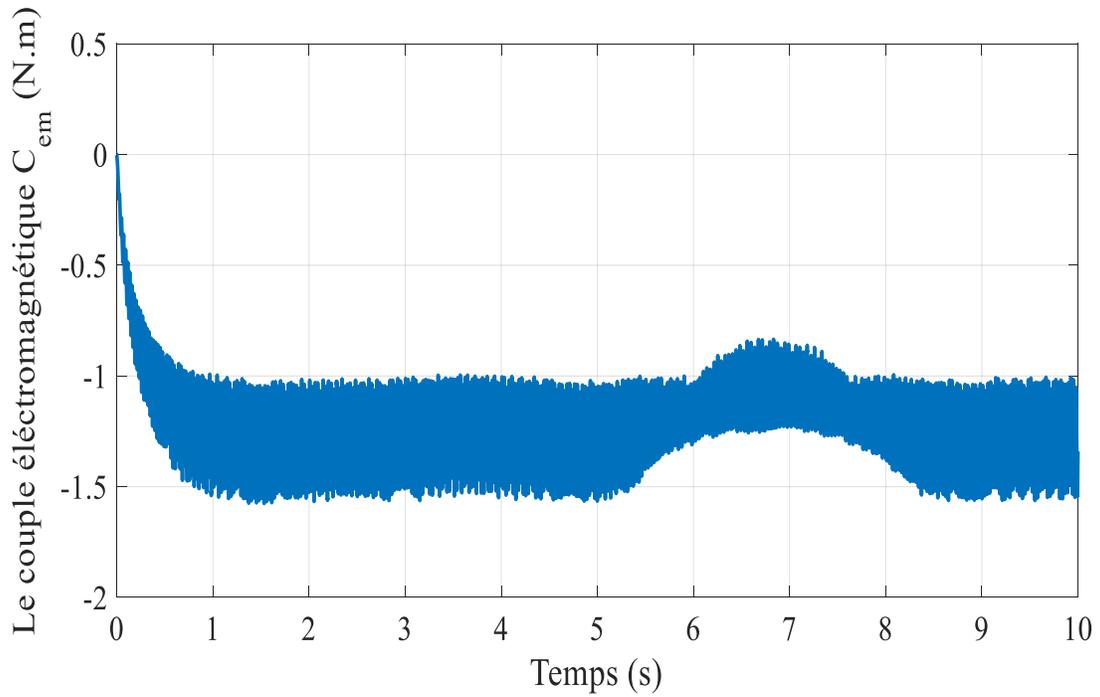


Figure III.5: Le couple électromagnétique.

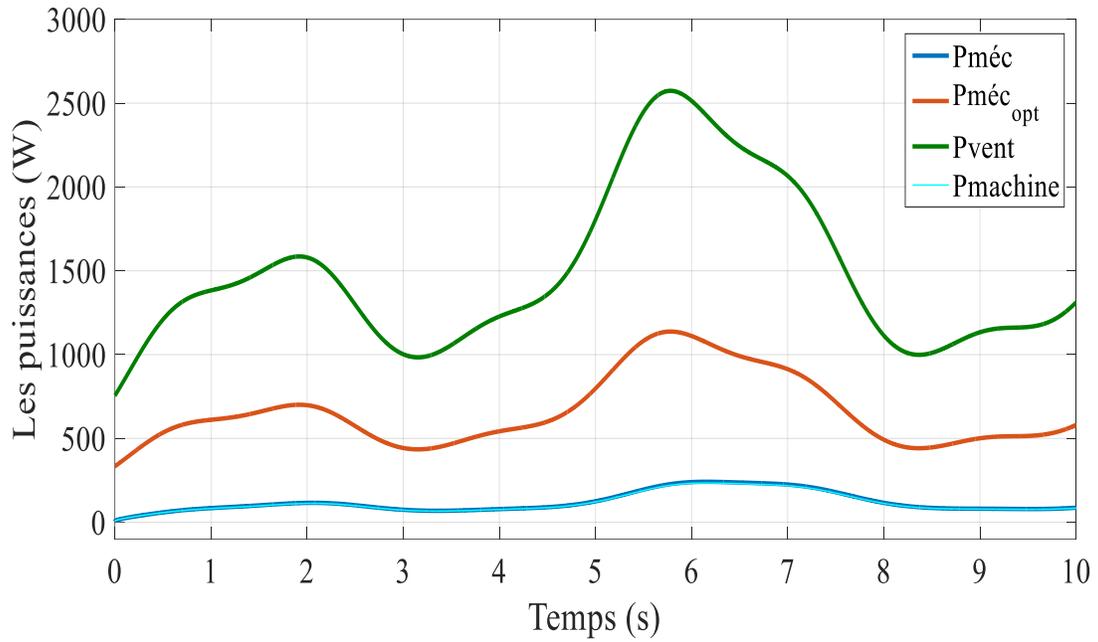


Figure III.6: Les courbes de puissances.

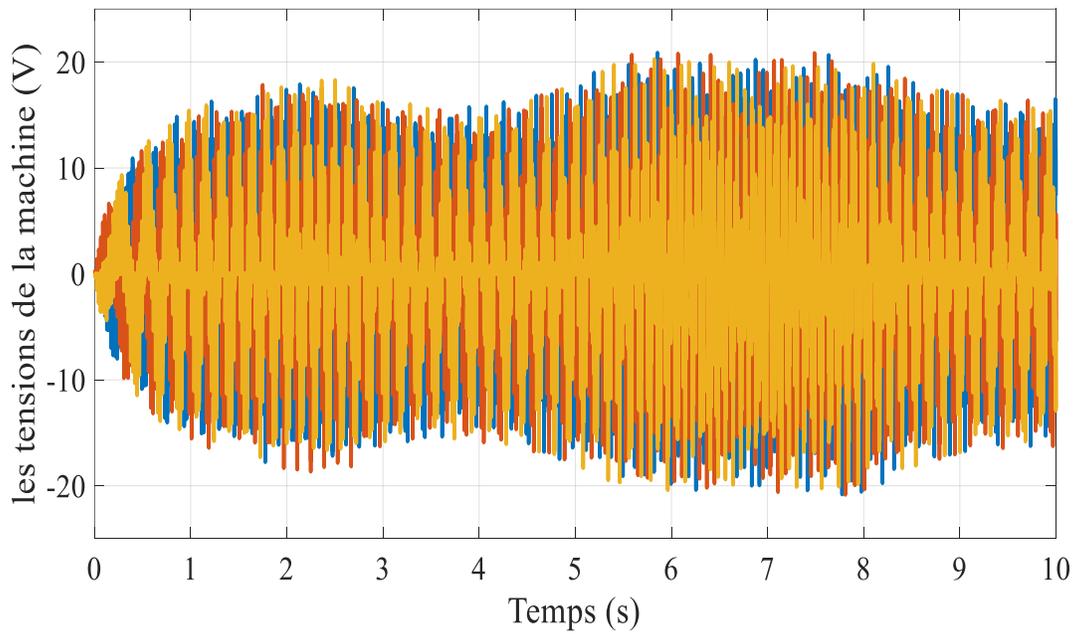


Figure III.7: Les tensions de la machine.

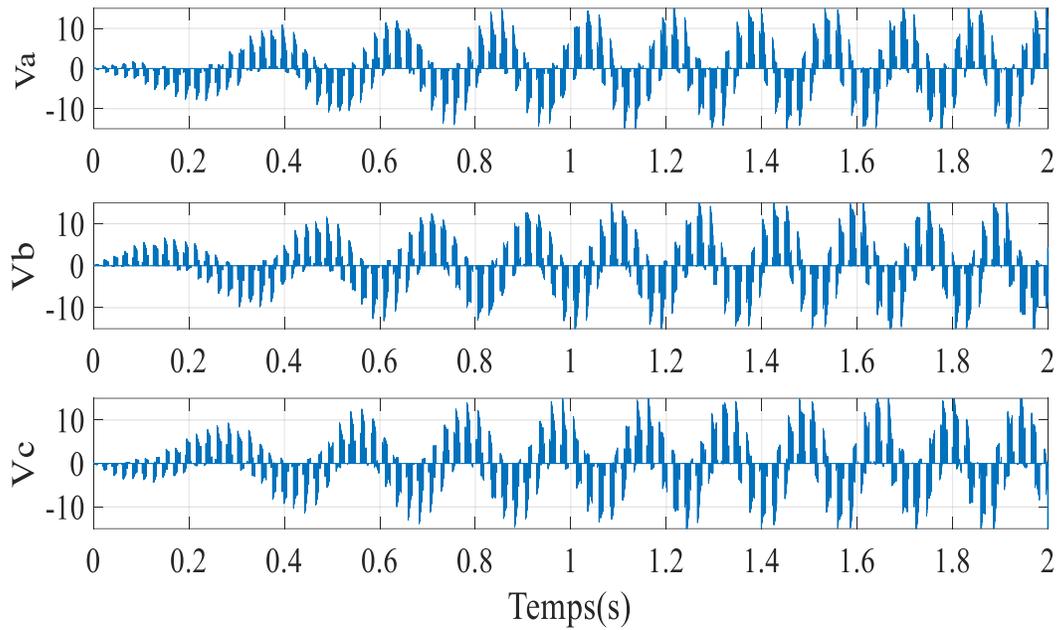


Figure III.8: Zoom sur les tensions de la machine.

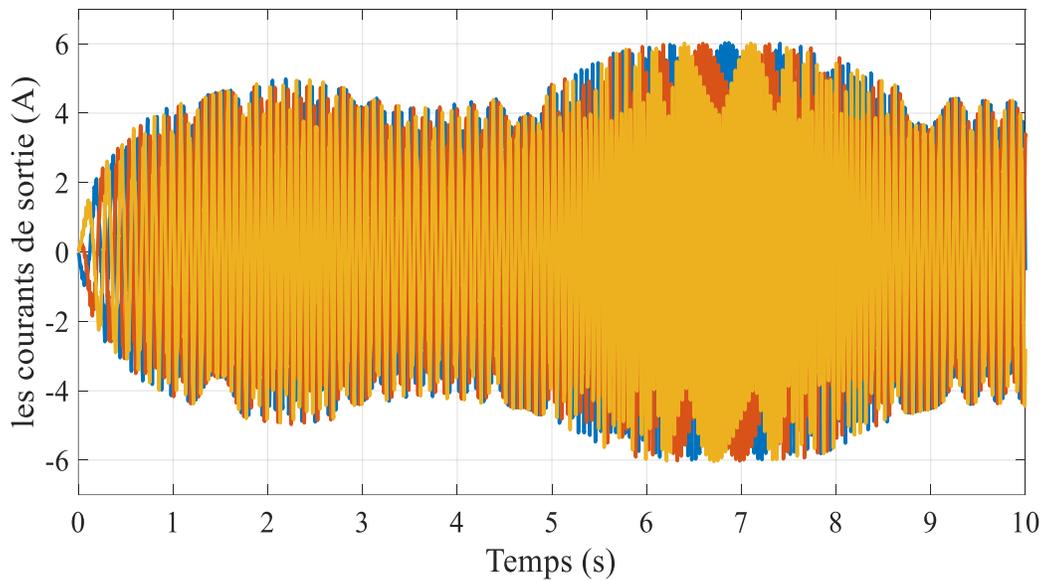


Figure III.9: Les courants de sortie de la machine.

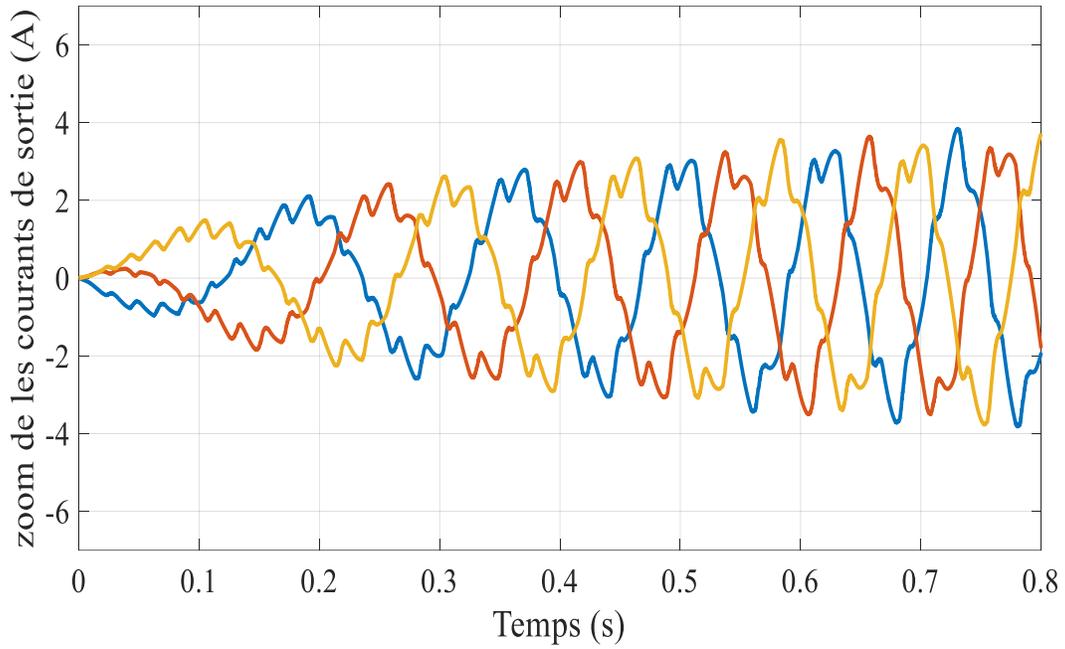


Figure III.10: Zoom sur les courants de sortie de la machine.

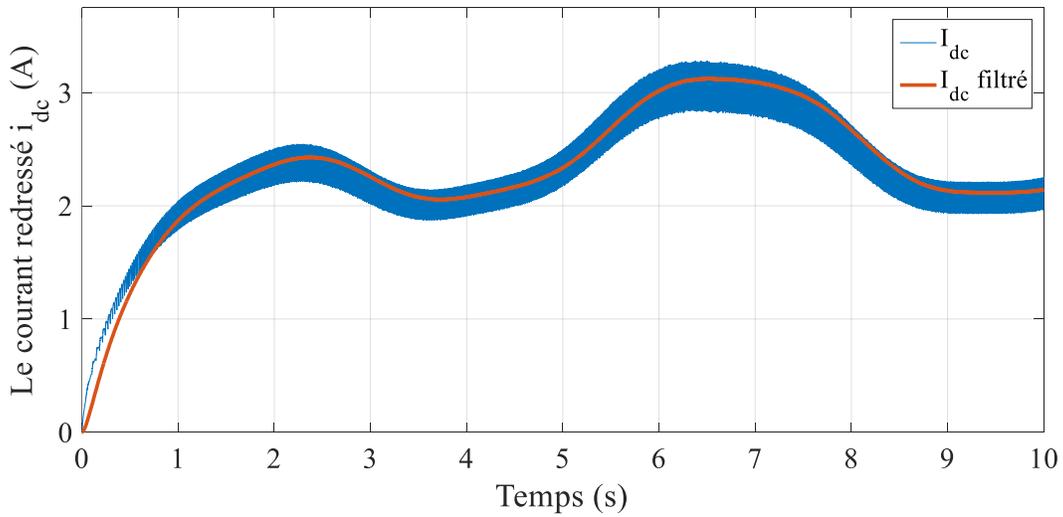


Figure III.11: Le courant redressé i_{dc} (de charge).

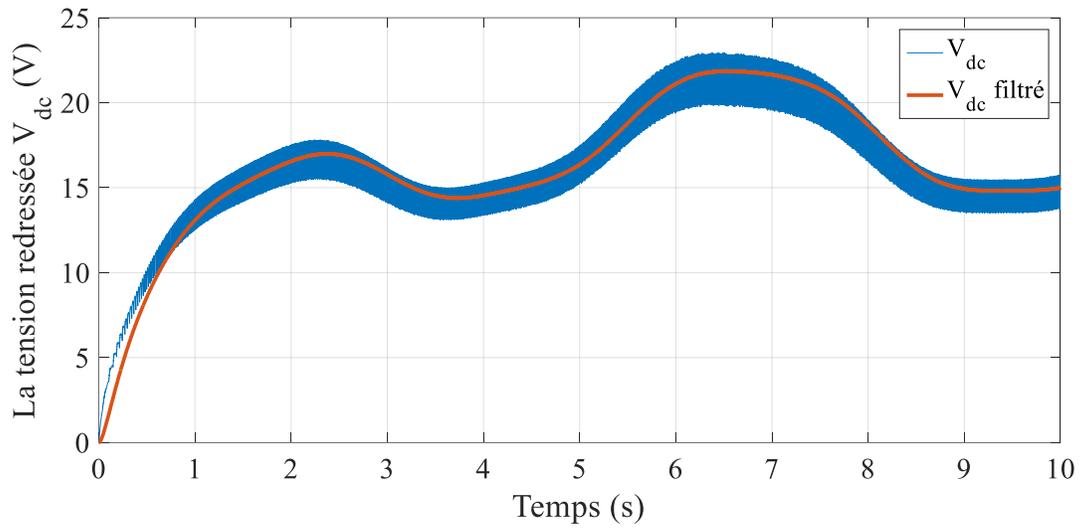


Figure III.12: La tension redressée V_{dc} .

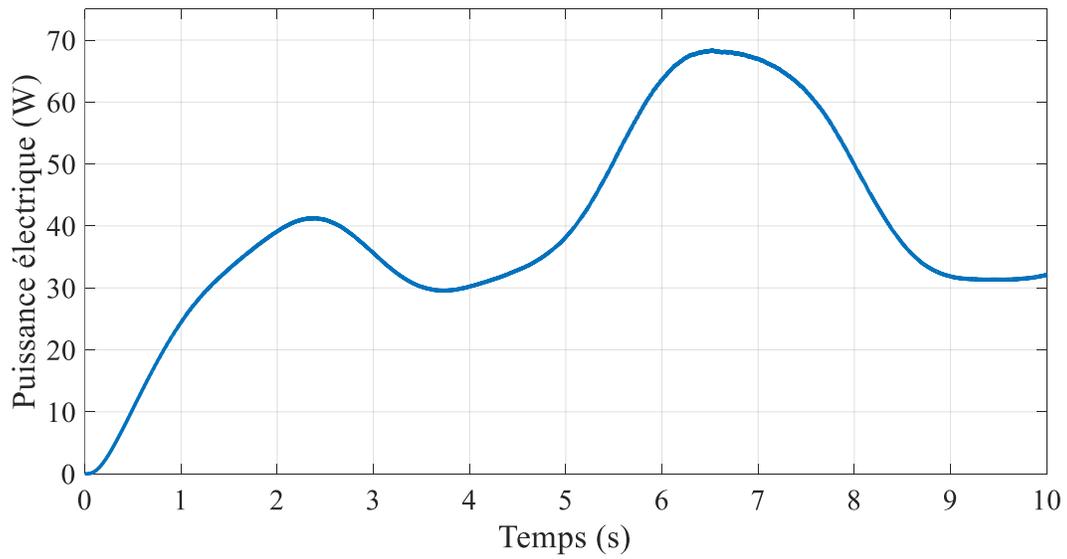


Figure III.13: La puissance électrique.

III.2.2 Discussion et interprétation des résultats

La (Figure III.2) montre un profil du vent proposé pour la simulation. La (figure III.3) indique la vitesse de la machine et la vitesse mécanique et la vitesse de la turbine, on remarque que la vitesse de la machine et la vitesse mécanique sont identique (76 rad/s), on remarque aussi que la vitesse de la turbine moins a les deux vitesses (7.6 rad/s), c'est l'effet de multiplicateur (la vitesse mécanique diviser sur le gain de multiplicateur $G=10$ dans notre cas). La (figure III.4) indique le couple mécanique et le couple de la turbine, on remarque que le couple de la turbine plus grand que le couple mécanique parce que le couple de la turbine divise sur le gain de multiplicateur. La (figure III.5) indique le couple électromagnétique. La (figure III.6) indique la puissance de vent et la puissance mécanique et la puissance totale de la machine et la puissance mécanique optimale, on remarque que la puissance totale de la machine et la puissance mécanique sont presque identique (240 W), on remarque aussi la puissance mécanique n'est pas maximisée ($P_{méc}$ optimale), ce qui exige un contrôle afin de maximiser la puissance, c'est la MPPT. La (figure III.7) et (figure III.8) indique les tensions de la machine, on remarque que les tensions sont sinusoïdales d'une amplitude de 20V. La (figure III.9) et (figure III.10) indique les courants de sortie de la machine, on remarque que ces courants sont sinusoïdales, il prend cette forme parce que le profil du vent devient maître de ces courants donc prend la même forme de profil du vent. La (figure III.11) montre le courant redressé d'une amplitude de 3 A, on remarque aussi que cette courant est toujours positif. La (figure III.12) montre la tension redressée d'une amplitude de 20 V. La (figure III.13) indique la puissance électrique totale exprimée dans le chapitre précédent (69 W).

Parce que nous avons vu que la puissance extraite de la turbine n'est encore maximisée, il est alors possible d'avoir plus, si nous utilisons une loi de commande de maximisation de puissance MPPT. La section suivante donne quelques techniques.

III.3 Technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) [34]

MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur pour une source variante (par exemple, la vitesse du vent dans le cas d'une éolienne). Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou éoliens. La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et à une forme de « cloche ». Pour chaque vitesse de vent, le système doit

trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la Figure.III.14, illustre les courbes caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance - vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent V_{vent} donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale illustrée par l'équation :

$$P_{m_opt} = \frac{1}{2} C_{p_opt}(\lambda_{opt}) \rho S V_{vent}^3 \quad (III.2)$$

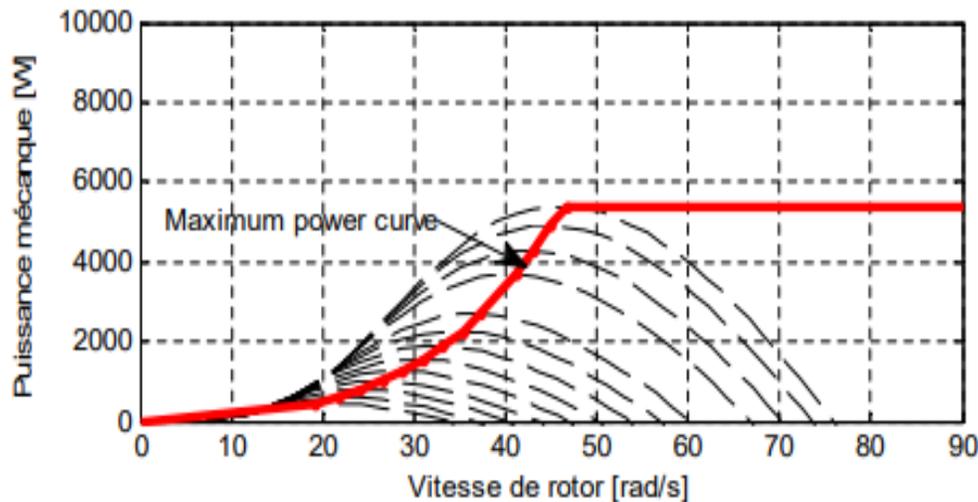


Figure III.14 : Caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance - vitesse de rotation [34].

Généralement, chacun des contrôleurs (MPPT) a été réalisé pour des applications spécifiques. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- Le rendement global du système désiré par le constructeur.
- Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge ou à un réseau électrique : (DC-DC, DC-AC, mono étage, multi étages... etc),
- L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux).
- L'évolution du point de puissance maximale en fonction de la vitesse.
- Le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux).

III.4 Différents méthode de la MPPT

III.4.1 MPPT par la méthode de la vitesse spécifique optimale (TSR optimale)

La vitesse spécifique optimale (en anglais Type Speed Ratio : TSR) pour une éolienne donnée est constant indépendamment de la vitesse du vent. Si le TSR reste constamment à la valeur optimale, il est garanti que l'énergie extraite sera maximisée. Par conséquent, cette méthode cherche à forcer le système de conversion d'énergie à rester à ce stade. La vitesse de la génératrice correspondante au TSR optimale est comparée à la vitesse réelle, et la différence de comparaison est transmise au contrôleur. Cela, à son tour, modifie la vitesse du générateur pour réduire cette erreur. La valeur optimale du TSR. Peut être déterminé expérimentalement ou théoriquement et stocké comme une référence. Bien que cette méthode semble simple car la vitesse du vent est mesurée directement et en continu, une mesure précise pour la vitesse du vent est impossible en réalité et augmente le coût du système. Le schéma de principe est illustré à la figure III.15 [33].

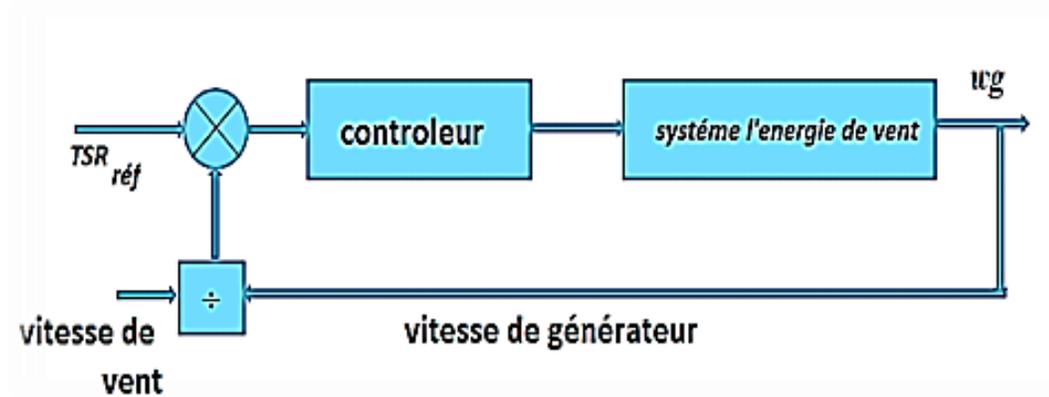


Figure III.15 : Schéma block de la méthode de MPPT lambda optimal (TSR) [33].

Dans cette méthode, la commande de la vitesse de rotor est nécessaire, pour cette raison un régulateur PI est utilisé pour effectuer cette régulation. Bien que cette méthode semble simple vu que la vitesse du vent est mesurée directement, une mesure précise de la vitesse du vent est impossible dans la réalité et augmente le coût du système. La figure (III.16) montre le schéma synoptique d'un système à vitesse variable avec la méthode MPPT de lambda optimal (TSR), voir [34].

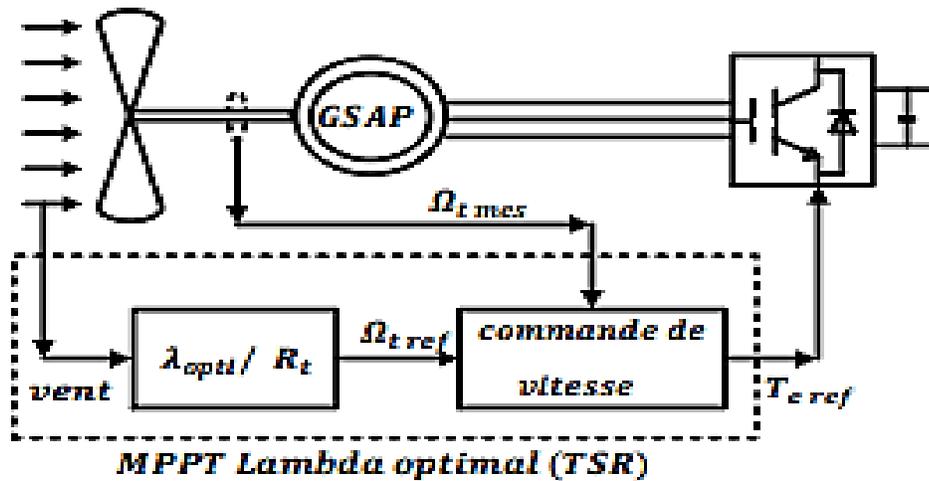


Figure III.16 : Schéma block de la méthode de MPPT lambda optimal (TSR) [34].

III.4.2 MPPT par la méthode de perturbation et observation (P&O)

L'algorithme P&O est l'un des plus simples. Il consiste à l'introduction d'une petite perturbation du rapport cyclique. Son effet est par la suite remarqué au niveau de la puissance de sortie de la GSAP. Si une augmentation de la puissance électrique est enregistrée par l'augmentation du rapport cyclique, alors ce dernier va être augmenté encore une fois avec le même pas que le précédent. Si par contre une diminution de la puissance est enregistrée suite à l'augmentation du rapport cyclique, la consigne suivante du rapport cyclique est alors inversée. Il est clair que cette méthode ne nécessite aucune connaissance préalable des paramètres mécaniques ou électriques du système éolien [33]. La figure III.17 indique l'illustration du principe de cette méthode.

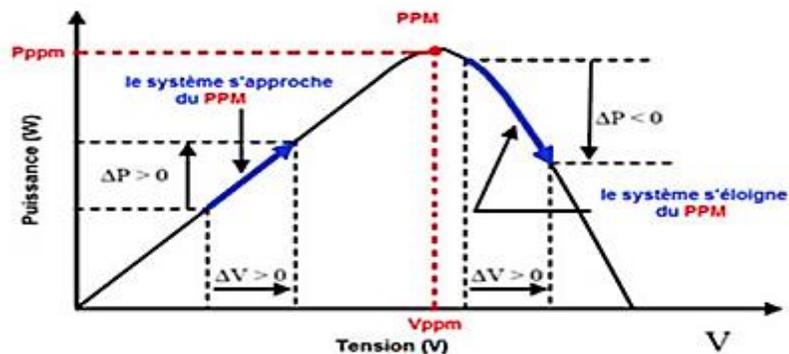


Figure III.17 : Caractéristique de Puissance d'une éolienne en fonction de Tension [33].

III.4.3 MPPT par la méthode d'asservissement du signal de la puissance (PSF, power signal Feedback) [33]

Dans cette méthode, il est nécessaire de connaître la courbe de puissance maximale de l'éolienne et de suivre cette courbe à travers ses mécanismes de contrôle. Les courbes de puissance maximale doivent être obtenues via des simulations ou des expériences hors ligne sur des éoliennes individuelles. Dans cette méthode, la puissance de référence est générée soit en utilisant une courbe de puissance maximale enregistrée, soit en utilisant l'équation de puissance mécanique de l'éolienne où la vitesse du vent ou la vitesse du rotor est utilisée comme entrée. La Fig.18 montre le schéma synoptique d'un système de conversion éolien avec contrôleur PSF pour une extraction de puissance maximale.

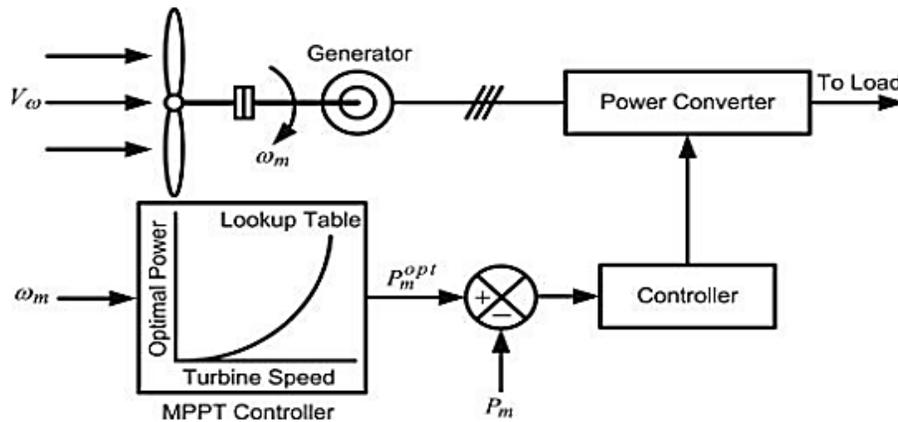


Figure III.18 : Le Block Diagramme de la méthode de retour de signal de puissance [33].

III.4.4 MPPT par la méthode de contrôle optimale de couple (OTC, optimal torque control)

Le fonctionnement maximal de la puissance peut également être réalisé avec un contrôle de couple optimale. Le principe de cette méthode consiste à ajuster le couple de la GSAP selon un couple de consigne maximum de l'éolienne, à une vitesse de vent donnée et en fonction de λ_{opt} . Pour ce but, un contrôleur PI a été appliqué pour fournir un signal de commande à l'éolienne. Dans cette méthode, la vitesse de la GSAP et la connaissance de λ_{opt} de la turbine est nécessaire.

La figure.III.19, montre le schéma de principe d'une éolienne avec la méthode de contrôle optimale de couple (OTC). Cette méthode est efficace, simple et rapide [32].

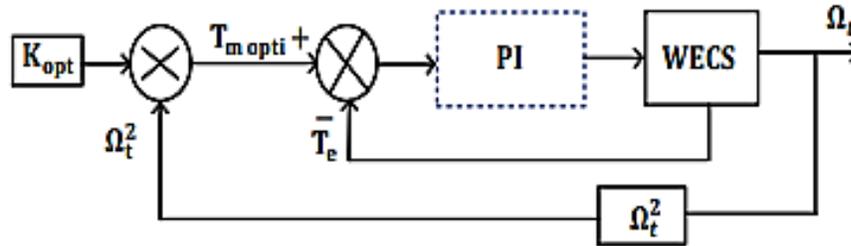


Figure III.19 : MPPT par contrôle optimale de couple (OTC) [32].

Dans notre travail, on va étudier la méthode de MPPT par la vitesse spécifique optimale TSR optimale.

III.5 Description du schéma de la commande

La figure III.20 indique le schéma de la cascade de conversion et de sa commande. La chaîne de conversion est composée de la turbine, de la machine synchrone à aimant permanent, d'un redresseur MLI et d'une charge électrique.

Le bloc MPPT génère la vitesse de référence en fonction de lambda optimale et la vitesse du vent. Cette vitesse de référence est comparée avec la vitesse de la machine. L'erreur de comparaison passe à travers un régulateur PI. Ce régulateur génère la référence du courant en quadrature i_{qref} , équivalent à une référence du couple de la machine. On impose une référence du courant directe i_{dref} , et on utilise deux régulateurs pour régler ces composantes du courant de la génératrice, et générer les références des deux composantes de tensions V_{dref} et V_{qref} , après addition des termes de découplage. La transformation triphasé-biphasé permet de générer les tensions de référence V_{aref} , V_{bref} et V_{cref} , utilisées pour la commande en MLI de redresseur.

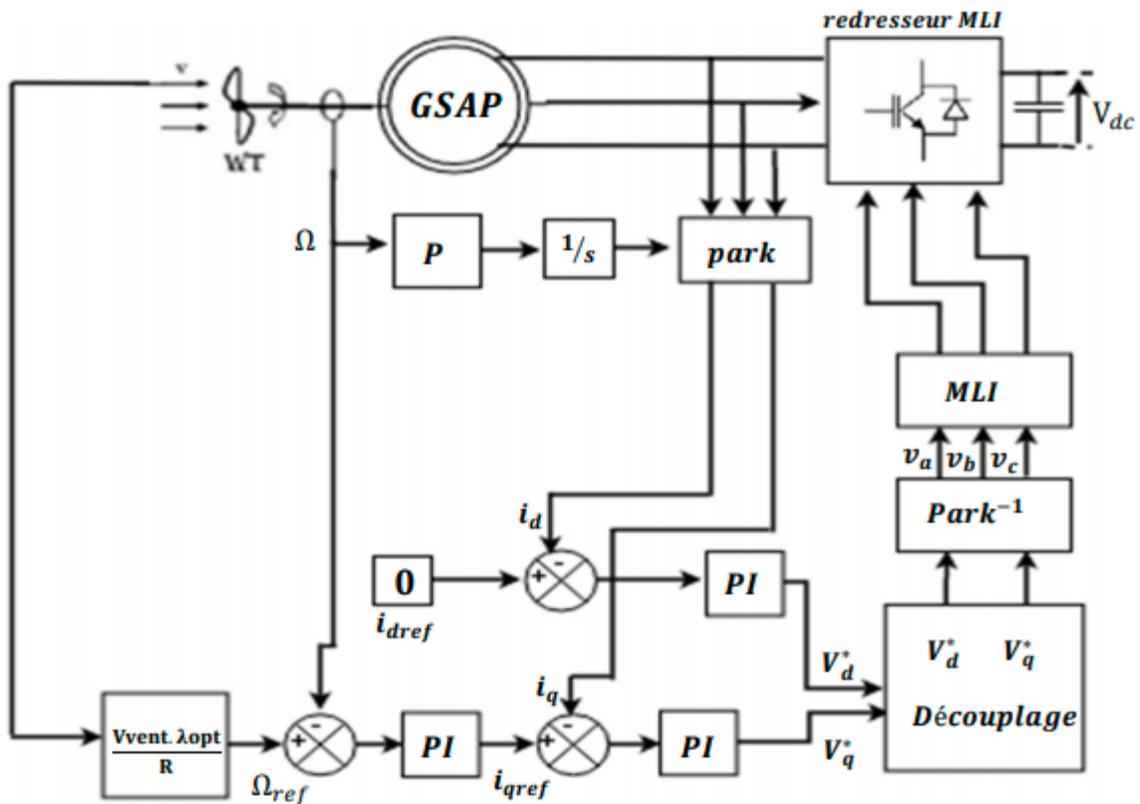


Figure III.20 : Schéma global de la chaîne de conversion et de sa commande.

III.5.1 Commande de rapport de vitesse λ

L'objectif prioritaire de cette commande est de maintenir λ à sa valeur optimale λ_{opt} . C'est de cette manière qu'on peut assurer que le coefficient de puissance est égal à sa valeur maximale. Le but, comme pour les autres méthodes, est donc de rester constamment au point $(\lambda_{opt}, C_{pmax})$. Il s'agit donc de faire varier la vitesse de rotation de la turbine Ω_{tur} en fonction des variations de la vitesse du vent V_{vent} . Ceci permet de travailler continuellement avec un rendement aérodynamique optimal. C'est un des avantages principaux des éoliennes à vitesse variable par rapport à celles fonctionnant à vitesse fixe [35].

La relation entre le coefficient λ , la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine:

$$\Omega_{tur} = \frac{V_{vent} \cdot \lambda}{R} \quad (III.3)$$

Par conséquent, si la vitesse de vent évolue, on obtient la vitesse de référence avec la formule suivante :

$$\Omega_{tur_réf} = \frac{v_{vent} \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (III.4)$$

L'avantage de cette méthode est sa simplicité. Cependant, elle dépend fortement de la mesure de la vitesse de vent, c'est-à-dire de la qualité de l'image du vent fournie par l'anémomètre. De plus, la fiabilité de la méthode tient de la justesse de la courbe de la puissance maximale en fonction de la vitesse du vent [35].

III.5.2 Commande par MLI

Pour la régulation des courants i_q et i_d on impose les tensions de référence V_{dref} et V_{qref} dont on déduit les tensions de référence sinusoïdales V_{aref} , V_{bref} et V_{cref} , pour la commande de redresseur [36].

Ces tensions de références seront comparées avec une tension de porteuse triangulaire de haute fréquence. Les instants d'intersection entre les signaux de référence et la porteuse déterminent les instants de commutation des interrupteurs du redresseur. La fréquence de commutation des interrupteurs est imposée par la fréquence de la porteuse.

III.5.3 Calcul des régulateurs

III.5.3.1 Régulateur de vitesse

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donné par:

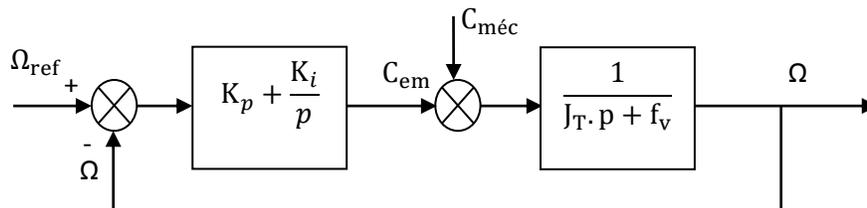


Figure III.21 : Boucle de régulation de vitesse.

La fonction de transfert équivalent à la boucle de réglage de la vitesse mécanique est décrite sous la forme suivante:

$$\Omega_{méc}(p) = F(p) \cdot \Omega_{réf}(p) - p(p) \cdot C_{méc}(p) \quad (III.5)$$

$$F(p) = \frac{K_p \cdot p + K_i}{J_T \cdot p^2 + (f_v + K_p) p + K_i} \quad (III.6)$$

$$P(p) = \frac{p}{J_T \cdot p^2 + (f_v + K_p) p + K_i} \quad (III.7)$$

On suppose que la perturbation est nulle.

La fonction de transfert s'écrira alors comme ceci :

$$\Omega_{méc}(p) = F(p) \cdot \Omega_{réf}(p) \quad (III.8)$$

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

$$\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right) p + 1 \quad (III.9)$$

Alors la fonction de transfert décrit sous la forme suivant :

$$F(p) = \frac{\frac{K_p}{K_i} \cdot p + 1}{\frac{J_T}{K_i} p^2 + \left(\frac{f_v + K_p}{K_i}\right) p + 1} \quad (III.10)$$

Par identification entre les équations (III.9) et (III.10) on à :

$$\frac{J_T}{K_i} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (III.11)$$

$$\frac{f_v + K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (III.12)$$

Ou :

K_p : Le gain proportionnel.

K_i : Le gain intégral.

Alors :

$$K_i = J_T \cdot \omega_0^2 \quad (\text{III.13})$$

$$K_p = \frac{2\xi K_i}{\omega_0} - f_v \quad (\text{III.14})$$

ξ : Coefficient d'amortissement.

Pour obtenir la réponse optimale on choisit le coefficient d'amortissement $\xi = 0.7$. Le temps de réponse à 5 % est donné par:

$$t_r = \frac{3}{\xi \omega_0} \quad (\text{III.15})$$

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

$$\tau_m = \frac{J_T}{f_v} \quad (\text{III.16})$$

τ_m : Constante de temps du système à régler. Alors :

$$\omega_0 = \frac{3}{\xi(\tau_m/2)} \quad (\text{III.17})$$

Enfin on peut déduire les valeurs de K_i et K_p

III.5.3.2 Régulateur de courant

Pour chacune des boucles de courants, nous avons adopté classiquement un régulateur de type Proportionnel intégral (PI). Compte tenu des équations du modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent présentée par (III.18), leur transformées de Laplace sont données par [07]:

$$\begin{cases} v_d(P) = -R_s i_d(P) - P \cdot L_d i_d(P) + \omega \varphi_q(P) \\ v_q(P) = -R_s i_q(P) - P \cdot L_q i_q(P) - \omega \cdot \varphi_d(P) + \sqrt{\frac{2}{3}} \omega \cdot \varphi_f \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Nous rappelons que les termes $e_{dq} = \omega \cdot \varphi_{dq}$ sont considérés comme étant des perturbations internes que l'on estime. Si nous admettons que la commande du convertisseur de tension, fonctionnant en modulation de largeur d'impulsions à fréquence de commutation élevée, est quasi parfaite tout en supposant nulles les pertes en commutation et en négligeant le retard du convertisseur statique, nous pouvons le modéliser par un simple gain et la commande du système

se déduit alors largement du modèle le représentant. La boucle de régulation d'axe d se présente alors sous la forme du schéma donné sur la Figure III.22. On note que la structure de la boucle de courant d'axe d est quasiment identique à celle de l'axe q. Dans ce qui suit, seule la régulation sur l'axe d sera décrite. La dynamique de la machine relative à la partie électrique est égale à :

$$G_{sd}(P) = \frac{1}{R_s + L_d \cdot P} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + \tau \cdot P} \quad (\text{III.19})$$

Avec : τ est la constante de temps électrique donnée par : $\frac{L_d}{R_s}$

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné par la Figure III.22

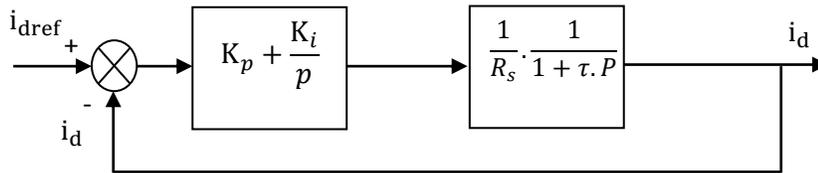


Figure III.22 : Boucle de régulation de courant.

La fonction de transfert de courant i_d en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO_{i_d} = \left(K_p + \frac{K_i}{P} \right) \left(\frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + \tau \cdot P} \right) = \frac{K_p \cdot P + K_i}{R_s \cdot P + L_d \cdot P^2} \quad (\text{III.20})$$

La fonction de transfert de courant i_d en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF_{i_d} = \frac{FTBO_{i_d}(P)}{1 + FTBO_{i_d}(P)} = \frac{K_p \cdot P + K_i}{L_d \cdot P^2 + (K_p + R_s) \cdot P + K_i} \quad (\text{III.21})$$

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

$$\frac{1}{\omega_0^2} p^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0} \right) p + 1 \quad (\text{III.22})$$

Alors en divisant l'équation (III.21) sur K_i on trouve :

$$FTBF_{i_d} = \frac{\frac{K_p}{K_i} \cdot P + 1}{\frac{L_d}{K_i} \cdot P^2 + \frac{(K_p + R_s)}{K_i} \cdot P + 1} \quad (\text{III.23})$$

Par identification entre les equations (III.22) et (III.23) on à :

$$\frac{L_d}{K_i} = \frac{1}{\omega_0^2} \tag{III.24}$$

$$\frac{(K_p + R_s)}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_0} \tag{III.25}$$

Alors :

$$K_i = L_d \cdot \omega_0^2 \tag{III.26}$$

$$K_p = \frac{2\xi \cdot K_i}{\omega_0} - R_s \tag{III.27}$$

III.5.4 Découplage

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre, ils sont reliés par des termes ou des coefficients non linéaires ωi_q , ωi_d et $i_d i_q$ [37].

Compte tenu des équations du modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimant permanent présentée par (III.28)

$$\begin{cases} v_{dref} = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega L_q i_q \\ v_{qref} = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega L_d i_d + \omega \varphi_{sf} \end{cases} \tag{III.28}$$

On remarque un couplage entre les variables des deux axes. C.à.d. que l'équation de l'axe d dépend à la fois des variables en d et en q. de même pour l'équation de l'axe q. Pour annuler ce couplage, on procède à la suppression des termes de couplage dans chaque axe, selon le schéma de la figure III.23.

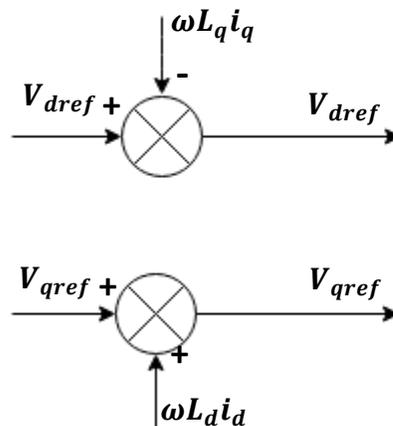


Figure III.23 : Description du découplage.

Après ce découplage, les équations de v_{dref} et v_{qref} devient :

$$\begin{cases} v_{dref} = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} \\ v_{qref} = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} + \omega \varphi_{sf} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

III.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'association en cascade de notre système et à sa commande. On a présenté le schéma global du système, et effectuer une simulation de son fonctionnement en boucle ouverte en imposant une commande en MLI parfaite sur le redresseur, c.à.d. en imposant des références triphasées sinusoïdales. Par la suite on a présente le schéma du système avec sa commande en boucle fermé, en décrivant et calculant les différentes partie de la boucle de commande.

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans ce mémoire concerne une étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent. Pour réaliser ce travail, nous avons commencé par une présentation générale des théories de l'énergie éolienne, où, nous avons commencé par une petite définition de cette source d'énergie, nous avons donné l'état actuel de l'utilisation de cette énergie dans le monde et en Algérie, comme nous avons présenté les différents types des turbines utilisées pour la conversion de l'énergie éolienne. Ensuite, et afin de bien comprendre les principes et la construction des différents types des cascades utilisées dans la conversion d'énergie, nous avons commencé le deuxième chapitre par une recherche bibliographique, où, nous avons donné les cascade possibles à utiliser, nous avons vu qu'ils existent beaucoup de technologies, qui dépendent essentiellement des types des turbines, des machines électriques ou des convertisseurs utilisés. Dans notre travail nous avons étudié une cascade de moyenne puissance à base d'une MSAP et un redresseur triphasé commandé, nous avons donné la modélisation de chaque élément avec résultats de simulation. Cette étude de modélisation et simulation nous a permis de bien comprendre les principes de chaque élément ce qui nous a facilité le reste du travail qui concerne l'association de ces éléments qui va constituer la cascade étudiée. Dans le troisième chapitre, une étude de l'association du système Eolien constitué des éléments suivants : éolienne, machine synchrone à aimant permanent, groupe convertisseur, et à la fin de cette cascade nous avons inséré une charge. Nous avons noté que dans ce cas de systèmes (en Boucle ouverte et sans commande) la puissance de sortie ne sera pas optimale est une étude de commande MPPT sera nécessaire. Nous avons fait une recherche bibliographique sur les techniques de commande MPPT disponibles, comme nous avons choisi et détaillé une loi de commande MPPT.

Comme tout travail de mémoire, le nôtre est certes non exhaustif et il mérite d'être continué dans beaucoup de directions. Nous pouvons proposer d'appliquer la commande en boucle fermée sur le système, et de valider l'algorithme d'MPPT proposé. On propose aussi de faire une étude sur l'effet des variations des paramètres de la machine pendant le fonctionnement du système, ainsi que, l'étude de l'effet de chaque défaut éventuel dans le système.

Références

- [01] **Y.Djeriri**, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de Doctorat en Sciences, Université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbès, Novembre, 2015.
- [02] **F. POITIERS**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [03] **Z.TIR**, « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [04] **H.MESAI AHMED, K.NADIR**, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de master en Électrotechnique, université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbès, juin 2017.
- [05] WWEA « Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne 2008 », Fev 2009, Allemagne
- [06] **A.TAMAARAT**, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA », Thèse de doctorat en génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, 08/12/2015.
- [07] **M.T.LATRECHE**, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire Magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif, 24 /06 /2012.
- [08] **Y.MOUSSAOUI**, « Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire de fin étude en génie électrique, Université d'EL-Oued, 09 sept 2015.
- [09] **M.BELABED, T.BENYAHIA**, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents. », Mémoire de master, université Tahar Moulay de Saida, juin 2015.
- [10] **S.METATLA**, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Mémoire de magister, école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.

- [11] **F.Louar**, « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », Thèse de doctorat 3ème cycle, Département d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2016.
- [12] **L.Khelfat, L.Maataoui**, « Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée », Mémoire de master, université Badji Mokhtar de Annaba, juin 2017.
- [13] **B.Madjid**, « Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone », Thèse de doctorat 3eme cycle en Électrotechnique, Université mouloud mammeri de Tizi-ouzou, 16 juin 2015.
- [14] **A.Rachedi, S.Sadkine**, « Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excité », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2017.
- [15] **M.Kherouf , Z.Kherici** , «Etude et modélisation d'une chaîne de conversion éolienne à base de MADA connectée au réseau », Mémoire de master ,Université Badji Mokhtar de Annaba, Juin 2017
- [16] **N.AIT AMARA**, « Etude Comparative des Machines Synchrones Excitées par Aimants et courants électriques », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2014.
- [17] **B.ASLOUNE**, « étude d'un système de pompage éolien », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2019.
- [18] **M. Kassa IDJDARENE**, «Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes», N° d'ordre : 40283/2010.
- [19] **A. Mirecki**, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.
- [20] **A. Abdelli**, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [21] **N.M.Melainine, D.Bochraye**, « Commande RST robuste d'un système de production éolien utilisant une machine asynchrone a double alimentation », Mémoire de master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel, 2019.

- [22] **K.Idjdarene, S.Belaid**, « Contrôle d'un système de pompage éolien », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2016.
- [23] **S.Fegrane**, « Commande MPPT d'un Aérogénérateur basée sur des observateurs neuro-flou », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2013.
- [24] **B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed**, Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherche dans le domaine de la génération éolienne, Actes des journées de jeunes chercheurs en génie électrique, Saint-Nazaire, pp 287-297, 2003.
- [25] **T.Merzougui, KH.Abdelkebir**, « Commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) », Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf de M'SILA, 2019.
- [26] **M. Mayouf**, « Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents », Thèse de doctorat, Université d'Al Hadj Lakhdar de Batna ,2014.
- [27] **D.Abdeldjalil**, « Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes », Thèse de magister, Université de Sétif ,2012.
- [28] **M.lechmat, D.bouziane**, « Simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne a base d'une génératrice synchrone a aimant permanentes », Mémoire de Master, Saad Dahlab de Blida.
- [29] **A.S. Toledo**, « Commande Directe et Observation des Convertisseur de Puissance: Application à l'Onduleur de Tension Triphasé », Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Institut National Polytechnique, Grenoble, 2000.
- [30] Communication, « Les Moteurs Synchrones et leurs Applications Industrielles », Journées de l'Enseignement, de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle, SEE-MAFPEN, Gif-sur-Yvette, Mars 1995.
- [31] **Y.Abderrahmane Bencherif**, « Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne », Mémoire d'Ingénieur, ENP d'Alger, 2008
- [32] **H.Tamissa, N.Touti**, « Comparaison entre les techniques d'extraction de puissance MPPT appliquées à une éolienne hybride», Mémoire de master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2017.

- [33] **A.Tebbal, M.Sekhri**, «Commande Prédicative d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent », Mémoire de master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel, 2019.
- [34] **B.Meghni**, «Contribution à l'amélioration des performances d'une chaine énergétique éolienne», Thèse de doctorat 3ème cycle, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2015.
- [35] **B.Kelkoul**, « Étude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire l'obtention de Magister API, Université de TLEMCEM, 29/06/2011.
- [36] **S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla**, article « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne », Université Mentouri de Constantine, le 28 Mars 2010.
- [37] **N.SENHADJI, A.CHALABI**, « Commande du moteur synchrone à aimants permanents par backstepping », Mémoire de Master, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 14/06/2015.

Annexe

Annexe 1 :

Le schéma global de la chaîne de conversion étudiée :

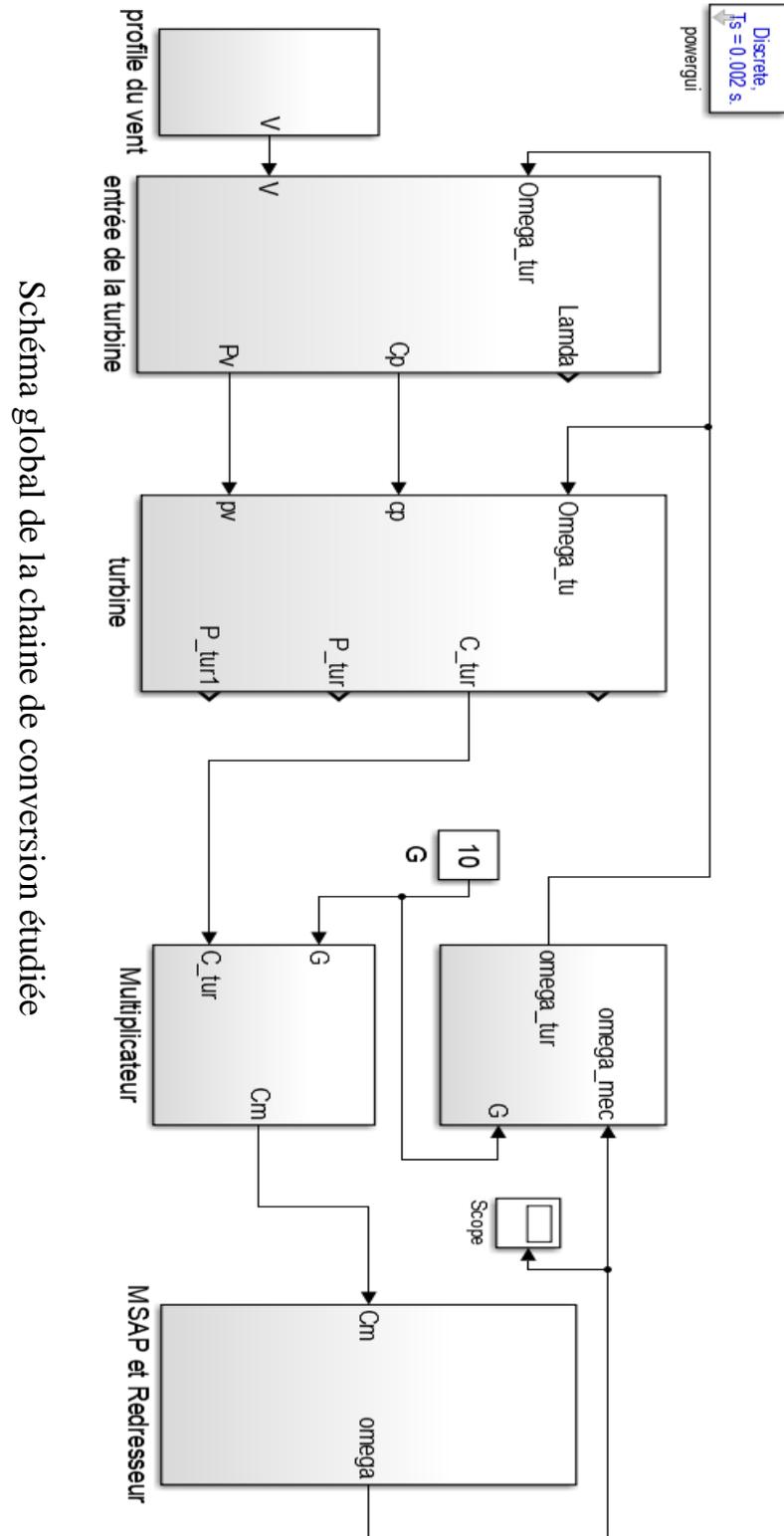


Schéma global de la chaîne de conversion étudiée

Annexe

Annexe 2 :

Le schéma de l'association MSAP-Redresseur :

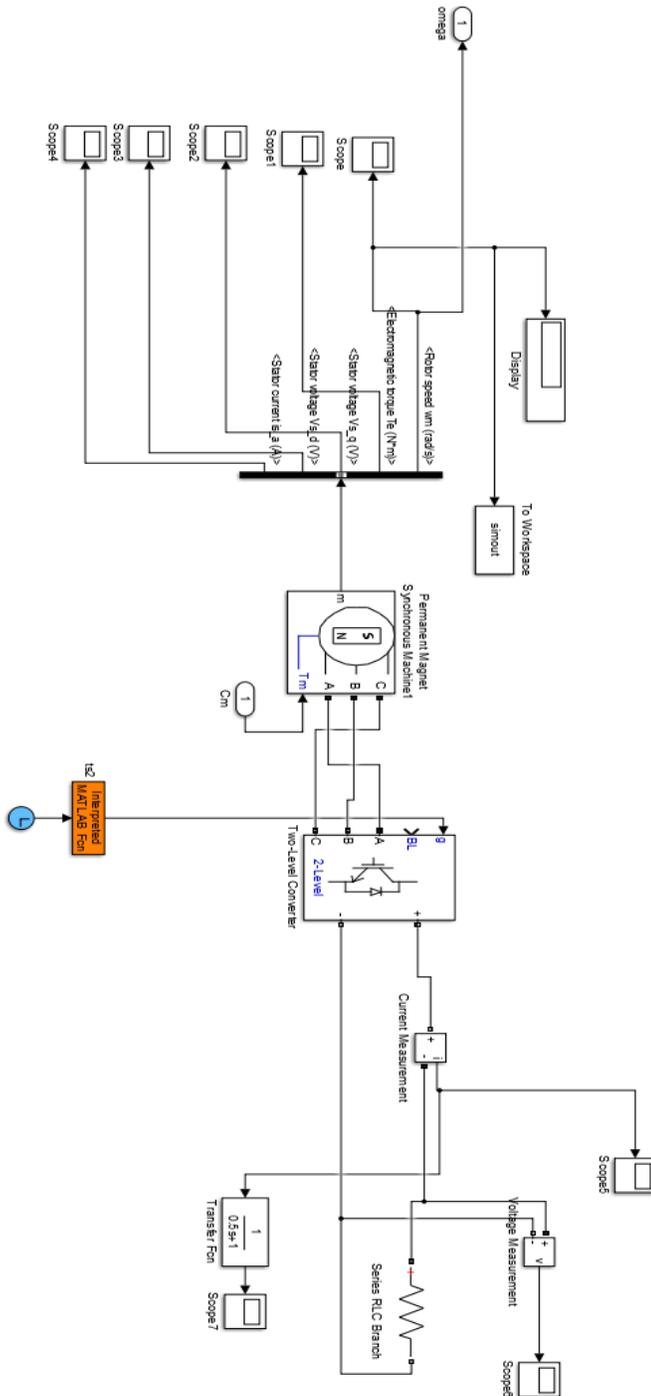


Schéma de l'association MSAP-Redresseur

Résumé

L'énergie électrique est considérée comme un des principaux facteurs essentiels dans la vie, sa demande augmente d'une façon exponentielle dans le monde. Parmi la variété des sources d'énergies, il y a les énergies renouvelables qui sont considérées comme énergie inépuisables, en particulier l'énergie éolienne. Cette énergie représente la plus grande source d'énergie à cause de ses nombreux avantages.

Dans ce mémoire, nous analysons la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion des énergies éoliennes avec simulation sont obtenus par MATLAB/SIMULINK.

Mots clés : MLI, Modélisation, Simulation, Matlab/SIMULINK.

Abstract

Electrical energy is considered one of the main essential factors in life, its demand is increasing exponentially in the world.

Among the variety of energy sources, there are renewable energies which are considered inexhaustible, especially wind energy. This energy represents the largest source of energy because of its many advantages.

In this memoir, we analyze the modeling and simulation of an elionic energy conversion chain with simulation are obtained by MATLAB/SIMULINK.

Keywords : PMW, Modeling, Simulation, Matlab/SIMULINK.

ملخص

تعتبر الطاقة الكهربائية من أهم العوامل الأساسية في الحياة، وبتزايد الطلب عليها بشكل كبير في جميع أنحاء العالم.

من بين مصادر الطاقة المتنوعة، هناك مصادر الطاقة المتجددة التي تعتبر طاقة لا تنضب، وخاصة طاقة الرياح. هذه الطاقة هي أكبر مصدر للطاقة لما لها من فوائد عديدة.

في هذه المذكرة، نقوم بتحليل النمذجة والمحاكاة لسلسلة تحويل من الطاقات الملية بالمحاكاة يتم الحصول عليها بواسطة MATLAB / SIMULINK.

الكلمات الدالة: تعديل عرض النبض، النمذجة، المحاكاة و Matlab / SIMULINK.