

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHARGE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GÉNIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme de master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : électrotechnique

Spécialité : Machine électrique

Thème

Etude d'un système hybride de production d'énergie Renouvelable

Presenté par :

Zidane Mohand said

Bekka Salah eddine

Encadré par :

Pr. Saou Rachid

Redouane Abderrahmane

Promotion 2022 / 2023

Remerciements

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre encadreur, Mr. Rachid SAOU et Mr. Redouan ABEDERRAHMANE pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée. Son œil critique qui nous a été très profitable pour améliorer la qualité de ce mémoire.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance aux membres du jury, Mr. bendahmane et Mr. Ouatah qu'il a bien voulu accepter de juger notre travail.

Nous remercions aussi nos familles, et tous nos amis pour leur aide, soutien et encouragements.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail. Merci également à tous ceux qui nous ont apporté leur aide pour parvenir au terme de ce travail.



Dédicaces

A mes chers parents,

Cette dédicace est un simple geste pour exprimer ma profonde gratitude envers vous. Votre amour, votre soutien et votre confiance ont été les fondements de ma réussite dans ce mémoire.

Votre présence inconditionnelle et votre soutien constant m'ont donné la force de surmonter les défis et atteindre mes objectifs.

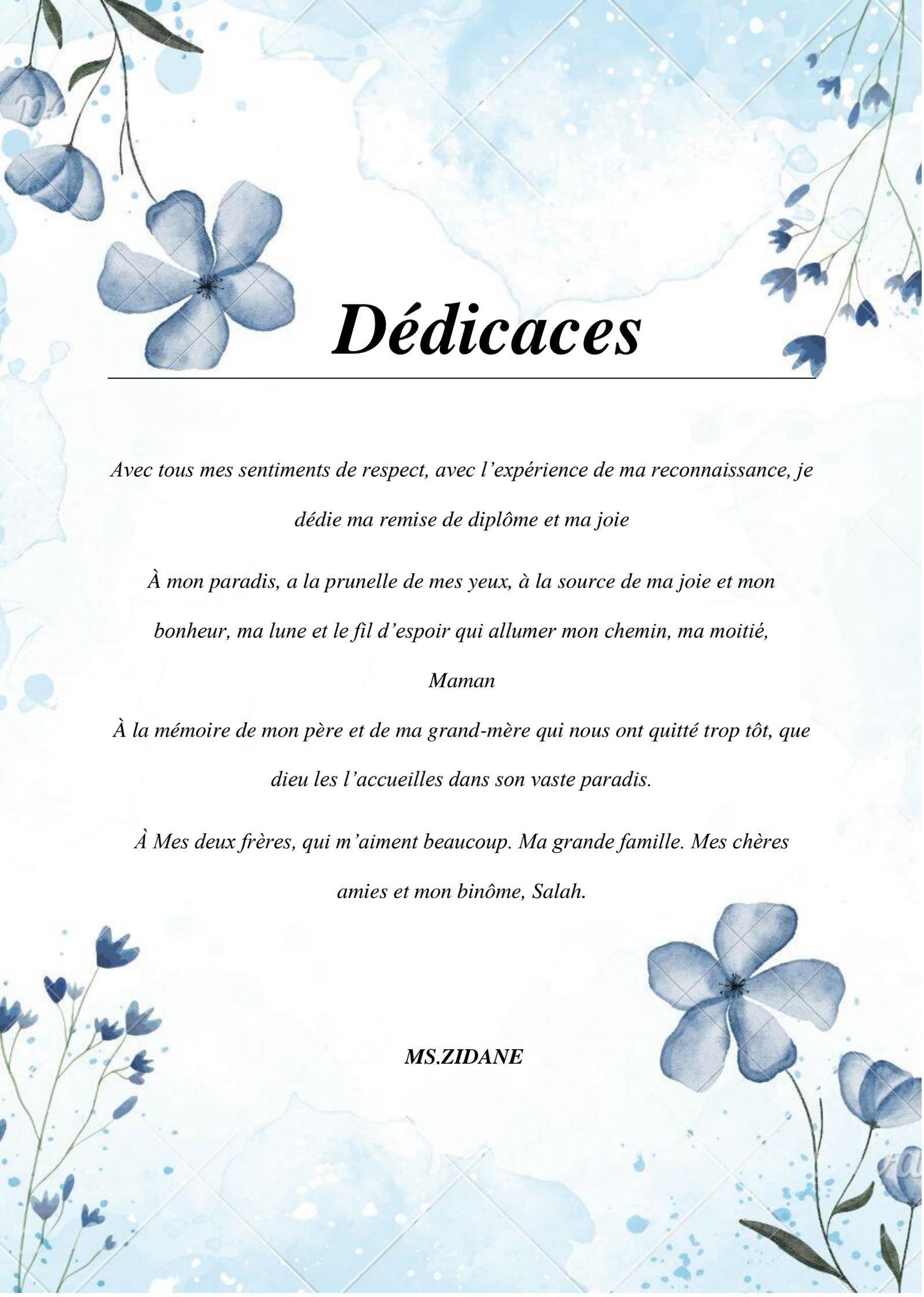
Merci pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi. Cette réussite est aussi la vôtre, car c'est grâce à votre soutien que j'ai pu arriver jusqu'ici.

Je suis également reconnaissant envers mon binôme, la collaboration avec lui a été formidable.

Son soutien et son dévouement ont été essentiel dans la réalisation de ce projet.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance sincère,

SE.BEKKA



Dédicaces

*Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je
dédie ma remise de diplôme et ma joie*

*À mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon
bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié,*

Maman

*À la mémoire de mon père et de ma grand-mère qui nous ont quitté trop tôt, que
dieu les l'accueille dans son vaste paradis.*

*À Mes deux frères, qui m'aiment beaucoup. Ma grande famille. Mes chères
amies et mon binôme, Salah.*

MS.ZIDANE

TABLE DE MATIERE

TABLE DE MATIERE.....	5
Introduction générale.....	1
I. État de l'art des énergies renouvelables.....	3
I.1 Introduction	3
I.1.1 L'énergie solaire	4
I.1.2 La biomasse	5
I.1.3 L'hydraulique.....	5
I.1.4 Géothermique	6
I.1.5 L'hydrogène.....	7
I.1.6 Les énergies marines.....	8
I.1.7 Les énergies éoliennes	9
I.2. Energie éolienne	10
I.2.1. Introduction.....	10
I.2.2 Définition de l'énergie éolienne	11
I.2.3 L'éolienne en Algérie	11
I.2.4 Ferme éolienne d'Adrar	12
I.3 Généralités sur les systèmes hybrides	14
I.3.1 Introduction.....	14
I.3.2 Généralité sur les systèmes éoliens.....	14
I.4.Composants d'un système hybride (éolien + batterie + charge)	15
I.4.1 Système éolien.....	15
I.4.2 Les différents types d'éoliennes	16
I.5 Composants d'une éolien.....	22
I.6 Mythes et réalité sur l'intégration de l'éolien :.....	23
I.7 Application des éoliennes	24
I.7.1 Systèmes Isolés.....	24

I.7.2 Systèmes Hybrides	25
I.7.3 Systèmes Liés au Réseau	25
I.8 Synthèse des avantages et des inconvénients de l'éolien	25
a) Avantages :	25
b) Inconvénients :	25
I.8 Conclusion :	26
Chapitre II : Modélisation et simulation de la MSAP	28
II.1 Types des machines électriques dans les systèmes éoliens.....	28
II.2 Introduction et historique.....	28
II.2.1 Les génératrices synchrones	29
II.2.2 Le générateur synchrone à aimant permanent	30
II.2.3 Avantage de GSAP	30
II.2.4 Les différents types d'aimants permanents	31
II.2.5 Structures à flux radial.....	32
II.3 Modélisation de la GSAP	35
II.3.1 Hypothèses simplificatrices	35
II.3.2 Les équations de tension et flux	36
II.3.3 Equation mécanique.....	36
II.3.4 Transformation de PARK	37
II.4 Modélisation de la GSAP dans Repère de Park.....	38
II.4.1 Equations électriques	39
II.4.2 Expression de la puissance et du couple électromagnétique	39
II.5 Simulation et interprétation	41
II.5.1 Simulation MSAP : mode moteur.....	41
II.5.2 Simulation MSAP : en mode Génératrice.....	45
II.6 Conclusion.....	51
Chapitre III : Modélisation et simulation de la turbine éolienne	53

III.1 Introduction	53
III.2 Conversion de l'énergie éolienne	53
III.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	53
III.2.2 Loi de Betz	54
III.2.3 La vitesse spécifique ou normalisée.....	55
III.2.4 Coefficient de puissance :.....	56
III.2.5 Coefficient de couple.....	56
III.2.6 Production d'énergie mécanique	57
III.3 Modélisation du système éolien	58
III.3.1 Introduction	58
III.3.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	59
III.3.3 Modèle de la turbine.....	60
III.3.4 Modèle du multiplicateur.....	60
III.3.5 Modèle de l'arbre.....	61
III.3.6 Modélisation de la batterie.....	61
III.4 Simulation de la chaine de conversion (GSAP + Batterie + Charge) :.....	64
III.4.1 Méthode de recherche du point maximum de puissance.....	64
III.4.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :	65
III.4.3 Commande du convertisseur DC/DC boost.....	67
III.4.4 Commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel	67
III.6 Conclusion	72
Conclusion générale	73
Bibliographie.....	74

Liste Des Figures

Figure I. 1 : Consommation d'énergie primaire dans le monde en 2020.	4
Figure I. 2 : Énergie solaire thermique.	4
Figure I. 3 : Énergie Biomasse	5
Figure I. 4 : Centrale hydraulique.	6
Figure I. 5 : Centrale géothermique.	7
Figure I. 6 : Site de production de l'hydrogène en utilisant l'énergie renouvelables (photovoltaïques)	8
Figure I. 7 : les énergies marines.s	9
Figure I. 8 : Site de production d'électricité avec énergie éolienne.	10
Figure I. 9 : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2009–2019.....	11
Figure I. 10 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie.	12
Figure I. 11 : Centrale d'énergie éolienne d'Adrar.....	13
Figure I. 12 : Schéma générale d'une installation hybride éolien+ battre avec système de stockage	15
Figure I. 13 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	15
Figure I. 14 : Configuration à axe horizontal.	17
Figure I. 15 : Types d'éoliennes a axe verticale.	18
Figure I. 16 : Turbine Savonius simple et son Principe de fonctionnement	19
Figure I. 17 : Les défèrent types d'éolienne offshore.s	20
Figure I. 18 : les composantes de l'aérogénérateur.....	22
Figure I. 19 : Evolution des caractéristiques d'une éolienne depuis 1984	24
Figure II. 1 : Les différentes classes des machines électriques.....	28
Figure II. 2 : Classement des machines synchrone.	29
Figure II. 3 : système éolien basé sur la machine synchrone et Redresseur diode.....	29
Figure II. 4 : Système éolien basée sur la machine synchrone à aimant permanent.	30
Figure II. 5 : Courbes de désaimantation des Principaux types d'aimants.....	32
Figure II. 6 : Configurations rotoriques des MSAP.....	33
Figure II. 7 : Machine équivalente au sens de Park.....	35
Figure II. 8 : Passage de repère triphasé (abc) au diphasé (d q).....	37
Figure II. 9 : Schéma bloc du moteur synchrone à aimants permanents.	42

Liste des Figues

Figure II. 10 : Transformation de Park.	43
Figure II. 11 : Vitesse de Rotation	43
Figure II. 12 : Couple électromagnétique.	44
Figure II. 13 : Courants statoriques Id et Iq.....	44
Figure II. 14 Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents.	47
Figure II. 15 : Tension Vd et Vq	48
Figure II. 16 : Transformation de Inverse de Park.....	48
Figure II. 17 Figure II.18: Tensions statoriques Vabc	49
Figure II. 18 : Courants statoriques Iabc.....	49
Figure II. 19 : Courants Id et Iq	49
Figure II. 20 : Tensions statoriques Vd et Vq.....	50
Figure II. 21: Couples électromagnétique et moteur	50
Figure II. 22 : Vitesse de rotation	50
Figure III. 1 : colonne d'air animée d'une vitesse v.....	53
Figure III. 2 : Tube de courant autour d'une éolienne.	54
Figure III. 3 : Vitesse du vent V et vitesse tangentielle Ωt et Rt	55
Figure III. 4 : puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent.....	58
Figure III. 5: Schéma du système éolien.	60
Figure III. 6 : Circuit équivalent d'une batterie plomb-acide.	63
Figure III. 7 : Le modèle de simulation et sa commande.....	64
Figure III. 8 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne (Matlab – Simulink)......	66
Figure III. 9 : Coefficient de puissance en fonction la vitesse spécifique.	66
Figure III. 10 : La boucle de régulation de courant.	67
Figure III. 11 : La boucle de régulation du système (tension/courant)	68
Figure III. 12 : Vitesse de vent.	69
Figure III. 13 : Puissance de : GSAP, Batterie, Charge.	69
Figure III. 14 : Courant de la batterie et sa référence.	70
Figure III. 15 : Etat de charge de la batterie (SOC).	70
Figure III. 16 : Tension de bus continue Vdc et de sa référence.....	71
Figure III. 17 : Tension de la batterie.....	71
Figure III. 18 : Courants directe Id et quadratique Iq de la GSAP	72

Tableau I. 1 : Comparaison Des Eoliennes à Axe Horizontal, Et à Axe Vertical..... 21

Tableau II. 1 : Les différent types d'aiment permanent 32

Notations des Symboles	
MS	Machine synchrone
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents
θ	Angla de décalage
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
η	Le rendement aérodynamique
G	Rapport de multiplication (Gain)
R	Rayon de la pale
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
P	Masse volumique de l'air
Λ	Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
(d , q)	Indice du repère de Park lié au rotor
$[P(\theta)]$	Matrice de transformation de Park
$[P(\theta)]^{-1}$	Matrice de transformation inverse de Park
$C_{p_{\text{max}}}$	Coefficient de puissance optimal de la turbine
T_t	couple de la turbine éolienne.
CSV	Commande à Structure Variable
PI	Régulateurs classiques (Proportionnelle, Intégrale)
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	Tension aux phases a, b et c
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Courant aux phases a, b et c
$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$	flux aux phases a, b et c
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator

Φ_f	Flux des aimants permanents
$(V_d V_q)$	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
$(I_d I_q)$	Composantes du courant statorique dans le repère de Park
Φ_d	Flux selon l'axe d
Φ_q	Flux selon l'axe q
ω	Vitesse de rotation électrique ($\omega = p \cdot \Omega$)
L_d	Inductance statorique selon l'axe d
L_q	Inductance statorique selon l'axe q
C_{em}	Couple électromagnétique
W_e	Energie emmagasinée dans le circuit magnétique
θ_{geo}	Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator)
P	Nombre de paire de pôle
e_{deq}	Termes de découplages
C_m	Le couple moteur appliqué sur la génératrice
J	Moment d'inertie total de la machine
F	Coefficient de frottement visqueux
R_{ch}	Résistance de charge
L_{ch}	Inductance de charge
S	Opérateur dérive de Laplace
I_d, I_q	Composant direct du stator dans le repère Park
C_{em-ref}	Couple électromagnétique de référence
V_{dc}	Tension en aval du pont redresseur
U_{bat}	Tension aux bornes de la batterie
I_{dc}	Courant de charge de la batterie
R_{bat}	Résistance interne de la batterie
V_{sabc}	Tensions aux phases a, b et c du stator

I_{sabc}	Courants aux enroulements a, b et c du stator
V_s	Vecteur tension statorique triphasée
I_s	Vecteur courant statorique triphasé
L_s	Inductance d'une phase statorique
P_n	Puissance nominal

Introduction générale

Le besoin croissant en énergie ainsi que les préoccupations environnementales ont suscité un intérêt considérable pour les sources d'énergie renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne se distingue comme une alternative prometteuse, offrant une solution propre et durable à la production d'électricité. Les éoliennes sont des dispositifs qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en énergie électrique utilisable.

Cependant, pour assurer une production d'énergie stable et fiable, il est souvent nécessaire d'intégrer plusieurs sources d'énergie et de combiner différents systèmes de conversion. C'est là qu'intervient le concept de système hybride de production d'énergie, qui associe l'éolien à d'autres sources d'énergie renouvelables ou conventionnelles. Ces systèmes hybrides permettent de maximiser l'efficacité énergétique, de réduire la dépendance à une seule source et d'assurer une alimentation électrique continue.

Le présent mémoire se focalise sur le développement d'un système hybride de production d'énergie basé sur une éolienne. Il s'articule autour de trois chapitres distincts, visant à approfondir la compréhension et la modélisation de ce système.

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble sur les énergies renouvelables, en mettant l'accent sur les éoliennes. Les différentes technologies éoliennes utilisées aujourd'hui sont expliquées de plus, une analyse approfondie des caractéristiques des éoliennes est réalisée, afin de mieux comprendre leur fonctionnement et leur intégration dans les systèmes de production d'énergie hybrides.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation et la simulation de la machine synchrone à aimant permanent, qui est utilisée comme générateur dans le système hybride étudié. La modélisation de cette machine est cruciale pour comprendre son comportement électromagnétique, sa réponse aux variations de charge et son efficacité énergétique. Des simulations seront réalisées pour évaluer les performances de la machine dans différentes conditions de fonctionnement.

Le troisième chapitre aborde la modélisation de la chaîne de conversion et la simulation du système éolien hybride. Cette étape essentielle consiste à intégrer les différents composants du système, tels que les éoliennes, les convertisseurs d'énergie et les dispositifs de stockage, pour analyser leur interaction et évaluer les performances globales du système hybride.

Introduction générale

simulations sont réalisées pour étudier les scénarios de fonctionnement et évaluer l'efficacité énergétique du système dans différentes conditions.

En conclusion, ce mémoire vise à explorer le potentiel des systèmes hybrides de production d'énergie basés sur une éolienne. il propose une approche méthodique pour la modélisation et la simulation de la machine synchrone à aimant permanent, ainsi que pour la modélisation de la chaîne de conversion et la simulation du système éolienne hybride.

I. État de l'art des énergies renouvelables

I.1 Introduction

Le mot « énergie » vient du grec ancien « énergeia », qui signifie « la force en action ». ce concept scientifique est apparu avec Aristote et a fortement évolué au cours du temps. aujourd'hui, l'énergie désigne la capacité à effectuer des transformations.

actuellement , la plus grande part de la consommation énergétique mondiale est dédiée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de charbon et leur faible coût d'exploitation expliquent que le charbon soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. en revanche, l'impact environnemental du charbon est remarquable même avec la présence des technologies plus récentes et moins polluantes. ensuite vient le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné qui est la principale technologie de la production d'électricité mise en service dans le monde [1]. En troisième place on trouve le nucléaire. certainement le pétrole est peu utilisé pour la production d'électricité à l'échelle mondiale mais en parallèle on le trouve avec le gaz à la première place pour la production de l'électricité dans notre pays l'algérie [2].

Cependant depuis ces dernières années étant donné l'accroissement du coût les combustibles fossiles et des problèmes environnementaux dérivés de leur exploitation, nous assistons à un à renouveau des énergies renouvelables.

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle humaine, largement disponible, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental [3]. Parmi les énergies renouvelables, on distingue trois grandes familles : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous formes de chaleur (géothermie, solaire thermique...)

Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur.

Consommation des énergies primaires en 2020

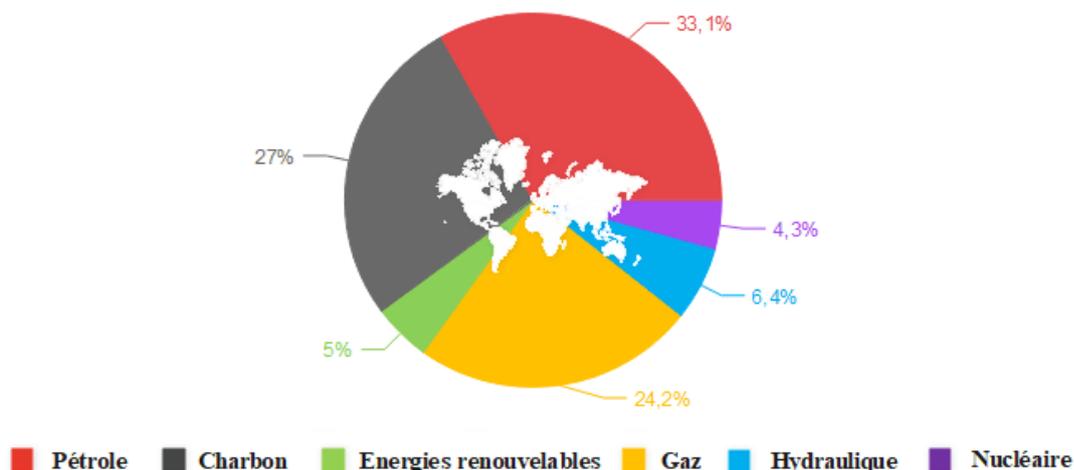


Figure I. 1 : Consommation d'énergie primaire dans le monde en 2020.

I.1.1 L'énergie solaire

Le soleil qui produit sa propre lumière et sa propre chaleur est à la fois l'origine de toute énergie renouvelable et conventionnelle sur terre.

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité (courant continu) à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage.



Figure I. 2 : Énergie solaire thermique.

I.1.2 La biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Des différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde [5]. Il s'agit aussi d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse ce qui est bien montré par **Figure (I.03)**. Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable [4].

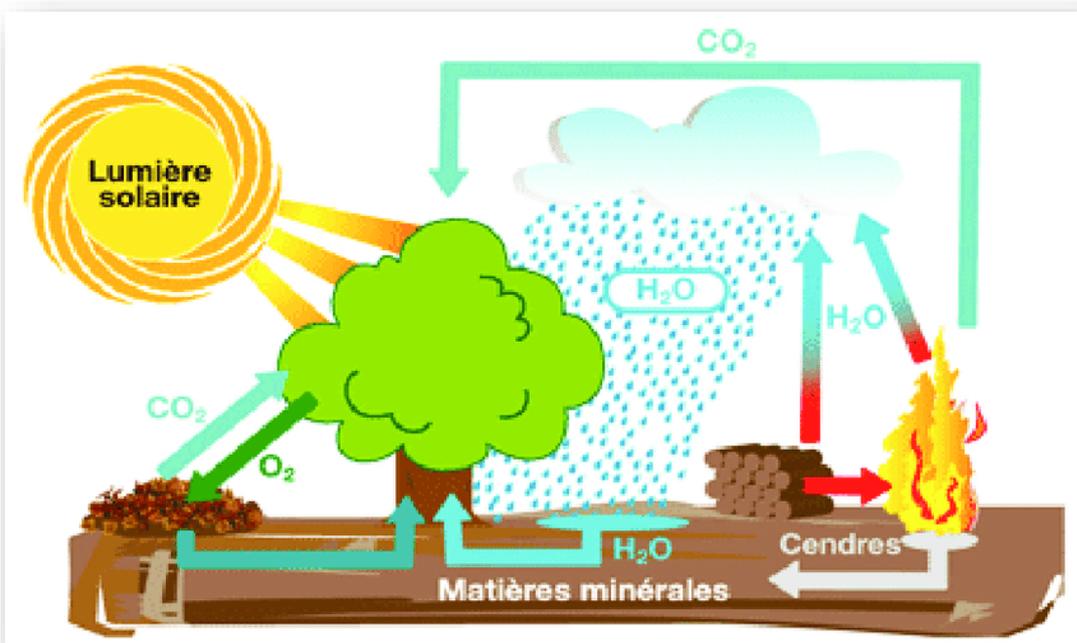


Figure I. 3: Énergie Biomasse

I.1.3 L'hydraulique

L'énergie hydraulique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en Énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique Situé autour de la roue motrice. La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source à l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière Assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des

Barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la Vie aquatique, des installations complexées, et des sites limités pour l'exploitation sont ses Principaux inconvénients

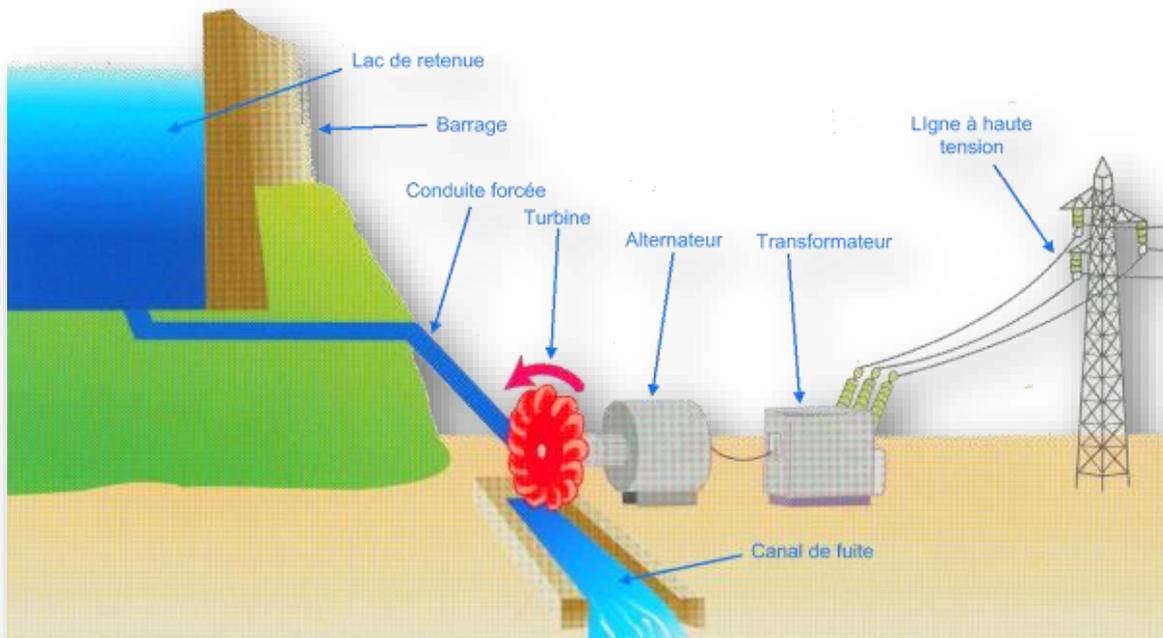


Figure I. 4 : Centrale hydraulique.

I.1.4 Géothermique

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé d'énergie thermique. Celle-ci est utilisée directement ou convertie partiellement en électricité par l'intermédiaire d'une turbine et d'un alternateur.

On distingue habituellement trois types de géothermie :

- la géothermie peu profonde (moins de 1 500 m) à basse température ;
- la géothermie profonde (jusqu'à 2 000 m) pour la production de chaleur
- la géothermie profonde à haute température (plus de 150 °C)

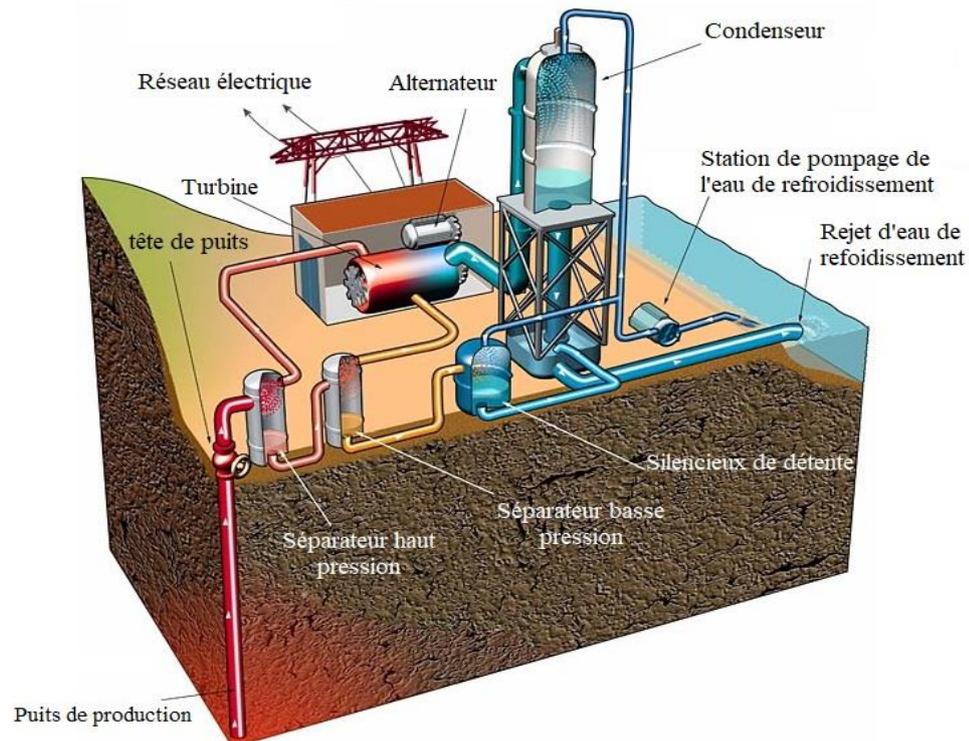


Figure I. 5 : Centrale géothermique.

I.1.5 L'hydrogène

Généralement, il est produit à partir d'eau ou d'hydrocarbures, soit par procédés thermochimiques avec captage du CO₂ émis lors de la fabrication, soit par électrolyse de l'eau. Après avoir été stocké et éventuellement transporté, il est utilisé comme énergie avec une pile à combustible ou par combustion directe. Cette énergie a plusieurs avantages :

- L'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie propre.
- L'hydrogène peut être stocké et distribué dans une variété de formes.
- L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles pour fournir de l'électricité de manière différente. Il peut être utilisé comme carburant pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité en faisant tourner la machine. Il peut également être directement utilisé par un électro-réacteur chimique dans les piles à combustible pour produire de l'électricité. Pour les puissances élevées la conversion la plus efficace de l'hydrogène à l'électricité peut être atteinte en production combinée en chaleur [9].

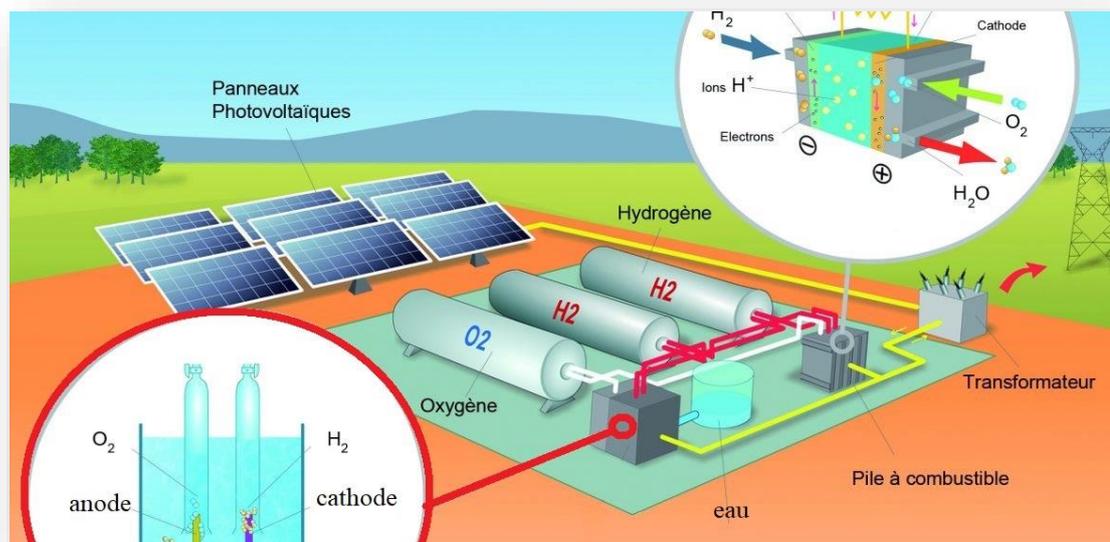


Figure I. 6 : Site de production de l'hydrogène en utilisant l'énergie renouvelables (photovoltaïques)

I.1.6 Les énergies marines

L'énergie marine ou des mers est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Tout comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir. [8]

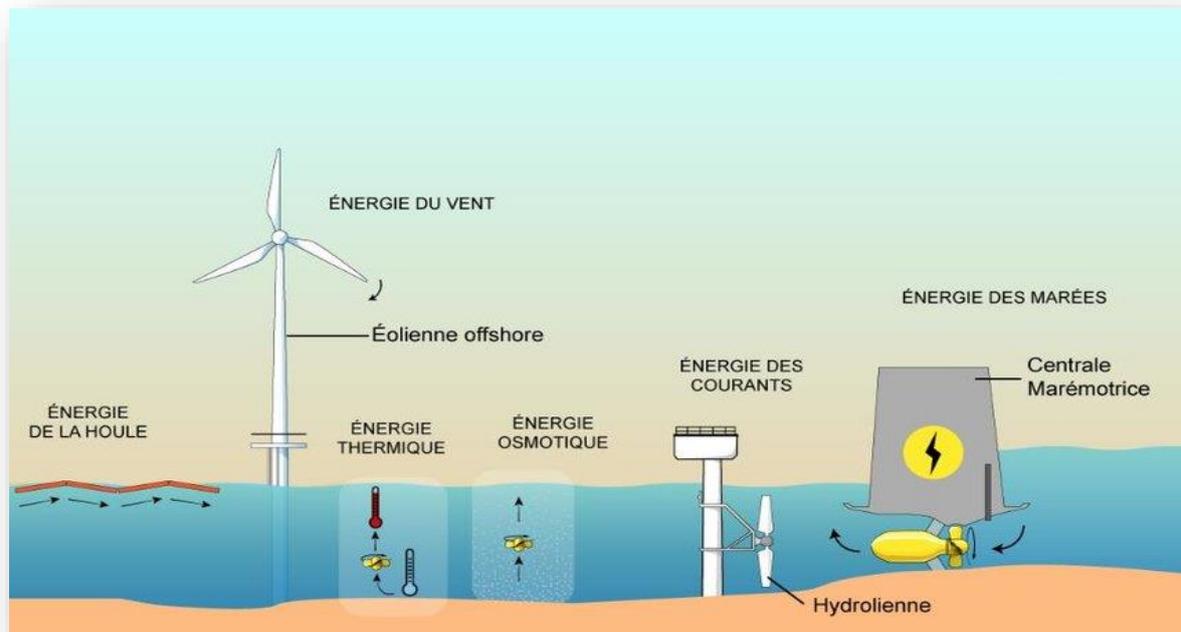


Figure I. 7 : les énergies marines.

I.1.7 Les énergies éoliennes

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales. Cette source est non polluante.

Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [6].

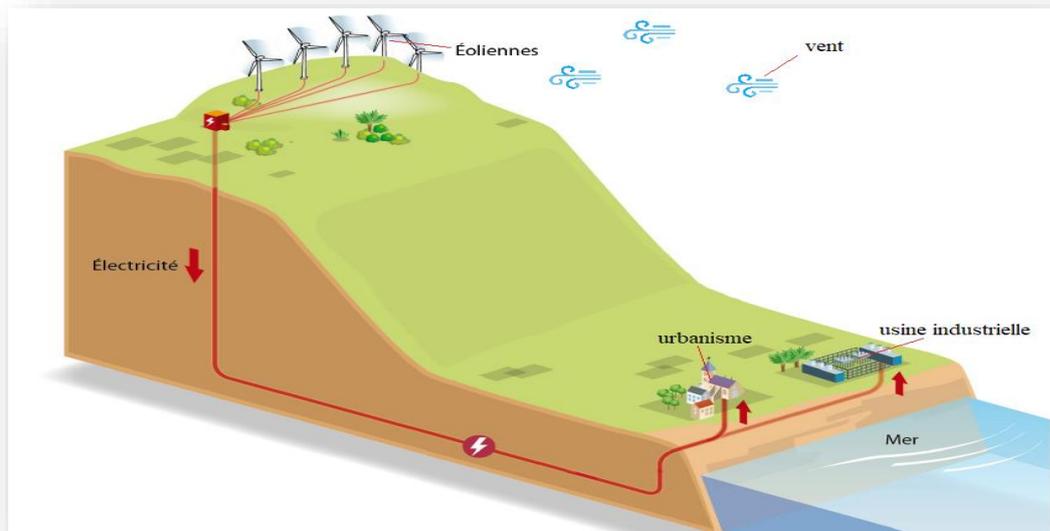


Figure I. 8 : Site de production d'électricité avec énergie éolienne.

I.2. Energie éolienne

I.2.1. Introduction

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [16, 17]. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [16, 18]

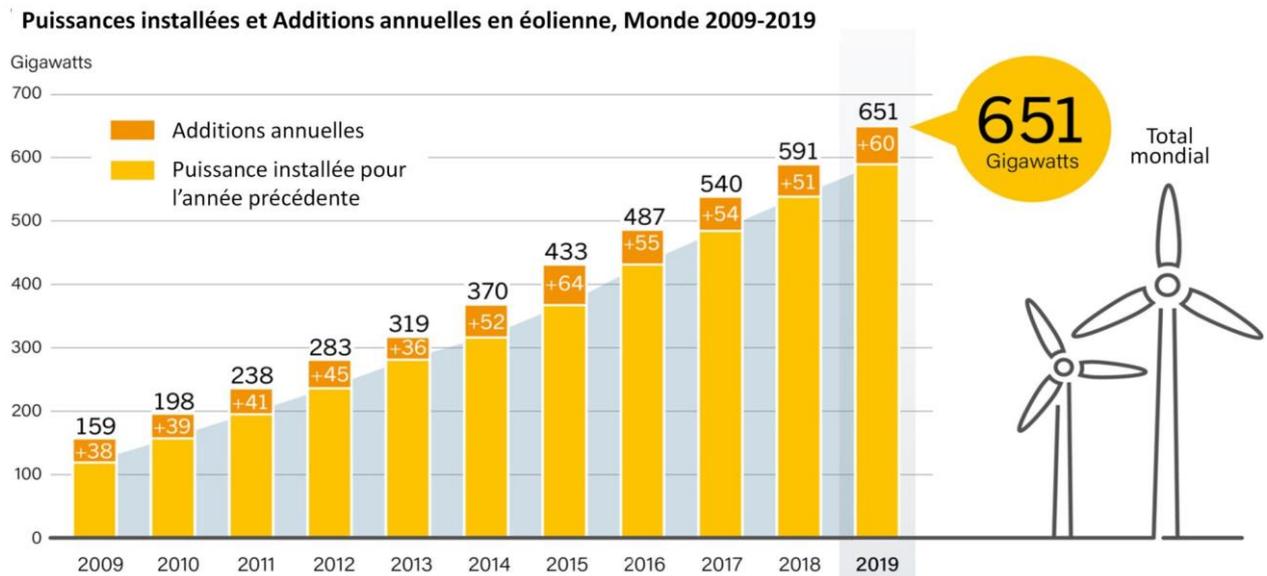


Figure I. 9 : Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2009–2019.

I.2.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présentée dans le vent et la transformée en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières : directe et indirecte. [19] :

- ✚ **Direct** : Soit Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- ✚ **Indirect** : Soit Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [18].

I.2.3 L'éolienne en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar. [23]

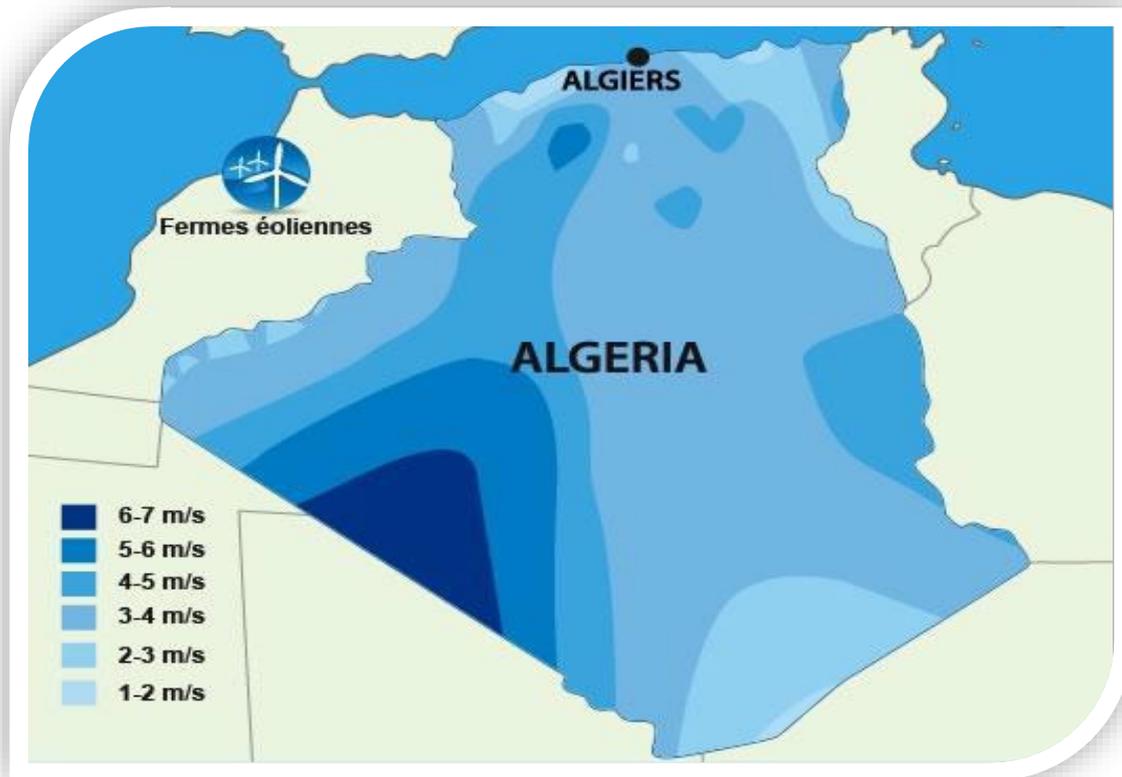


Figure I. 10 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie.

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de neuf zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes [22] :

- Deux zones sur le littoral
- Trois zones sur les hauts plateaux
- Et quatre zones en sites sahariens.

I.2.4 Ferme éolienne d'Adrar

Octobre 2011 que la ferme éolienne d'Adrar, qui doit servir de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024, a été mise en service par le ministre de l'Energie, Youcef Yousfi.

Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune (pour une capacité globale de de 10 mégawatts), la ferme éolienne d'Adrar, implantée sur une superficie de 30

hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya, a nécessité près de 32 mois travaux. Entamés en octobre 2011, les travaux de réalisation de la ferme éolienne d'Adrar confiés à la société française CEGELEC en partenariat avec un groupement composé de sociétés filiales de Sonelgaz, ETTERKIB et INERGA, en l'occurrence pour un coût global de 2,8 milliards de dinars devaient être achevés au deuxième trimestre de l'année 2013.

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.

En matière d'énergie renouvelables, le plan du gouvernement accuse un énorme retard.

Le plan lancé en 2011 devrait être réalisé en trois phases. La première (2011-2013), consacrée aux études et au lancement de projets pilotes ; la seconde (2014-2015), à la réalisation des premières installations, et la troisième (2016-2020), au lancement de l'industrie à grande échelle.[24]



Figure I. 11: Centrale d'énergie éolienne d'Adrar.

I.3 Généralités sur les systèmes hybrides

I.3.1 Introduction

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique.

L'avantage d'un système hybride par rapport à un système pur éolien ou pur photovoltaïque, dépend de beaucoup de facteurs fondamentaux : la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne, le champ photovoltaïque, le système de stockage électrochimique et d'autres facteurs d'efficacité.

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour les installations de faibles puissances. Pour les systèmes d'énergie autonomes le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations de grandes puissances.

Minimiser le coût du stockage et optimiser sa capacité est la raison essentielle de la combinaison des systèmes éolien et photovoltaïque.

I.3.2 Généralité sur les systèmes éoliens

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel...), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé.

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système qui nous intéresse regroupe deux parties pour la production de l'énergie.

Les systèmes d'énergie hybrides peuvent être connectée aux réseaux électriques ou autonomes, pour le premier cas La production énergétique hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. La connexion des sources hybrides aux réseaux électriques doit respecter certaines normes qui ne sont pas forcément spécifiques au domaine d'énergies renouvelables.

Dans les sites isolés où le réseau n'existe pas, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire que le système hybride possède une autonomie totale. Il est donc impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou hydrogène au système dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées.

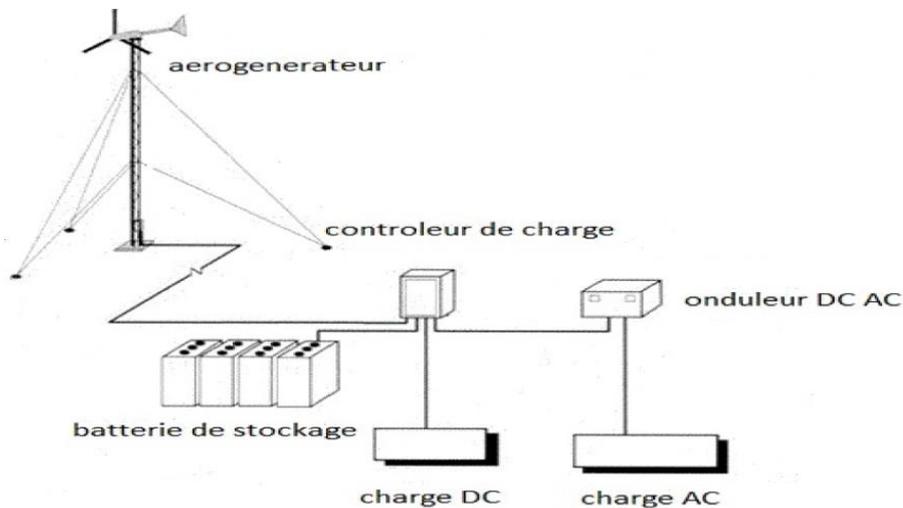


Figure I. 12 : Schéma générale d'une installation hybride éolien+ batterie avec système de stockage

I.4. Composants d'un système hybride (éolien + batterie + charge)

I.4.1 Système éolien

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (le vent fait tourner les pales du dispositif), elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables.

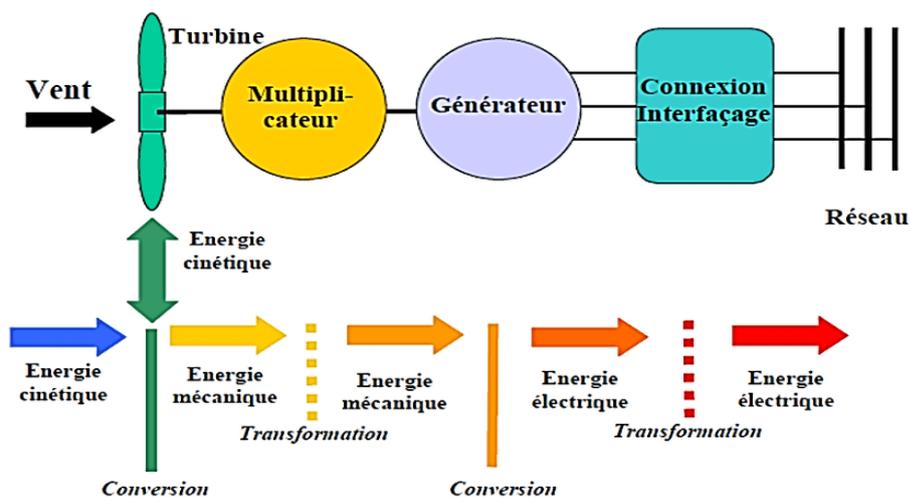


Figure I. 13 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.4.2 Les différents types d'éoliennes

On peut classer les éoliennes selon plusieurs critères, par rapport à leurs axes ou bien selon leurs gammes de puissances et leurs diamètres.

Il existe deux types d'éoliennes modernes : celle à axe horizontal dont le rotor ressemble à une hélice d'avion ; et l'éolienne à axe vertical dont la forme s'apparente à celle d'un batteur à œuf à l'envers.[13]

I.4.2.1. Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

Sur base la du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes :

a) Eolienne face au vent « up wind »

Ce sont les plus répandues, le rotor est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône, comme on le voit sur la figure (Figure I.13). À l'arrière du pylône, il y a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône.

Il en est de même devant le pylône mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylône. Cependant, chaque fois qu'une des pales passe devant le pylône, la puissance instantanée de l'éolienne diminue brièvement. Ce phénomène est cependant compensé par la forte inertie de l'hélice.

Les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par fort vent. Ceci est l'inconvénient majeur de ce type de structure. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours tourné face au vent, [15].

b) Eolienne sous le vent « down wind »

Elles sont les plus simples car le positionnement du rotor est naturel et automatique en fonction de la direction du vent. Le rotor se situe alors derrière le pylône comme le montre la figure (Figure I.14). Cependant, comme la liaison électrique s'effectue le plus souvent par des câbles pour les aérogénérateurs de forte puissance, il faut quand même prévoir un système

d'orientation permettant leur détorsion (un système bagues et balais collecteurs n'étant pas appropriés pour remplacer les câbles pour des courants de 1000Ampère).

Un grand avantage de ce montage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône par fort vent, la flexion des pales enlève une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Une éolienne sous le vent a donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent.

Par contre le pylône fait obstacle au vent et lorsque la pale passe dans l'ombre de celui-ci, elle subit une forte variation d'efforts de flexion et de rotation. Il augmente le risque de rupture de la pale par fatigue du matériau et génère une production fluctuante d'électricité, [15].

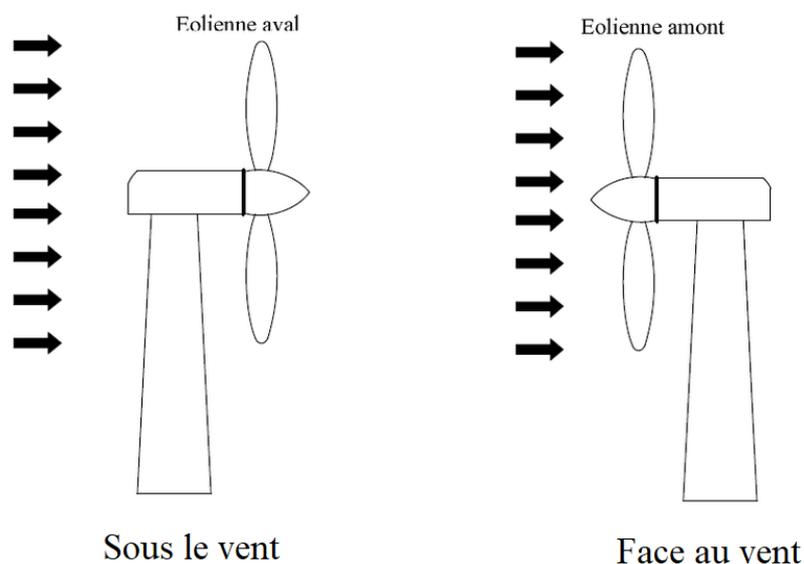


Figure I. 14 : Configuration à axe horizontal.

I.4.2.2. Les éoliennes à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation

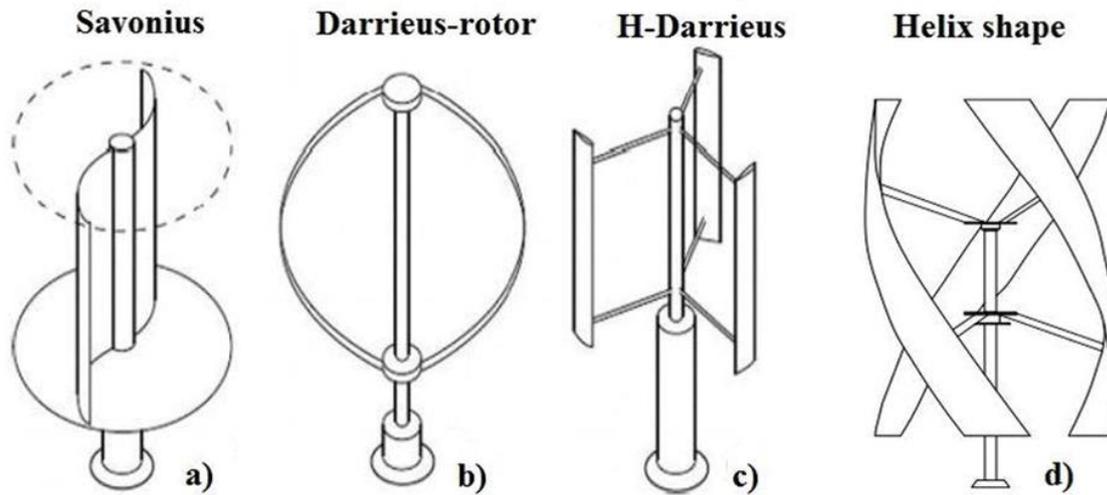


Figure I. 15 : Types d'éoliennes à axe verticale.

a) Eolienne Darrieus

Le rotor de Darrieus fonctionne grâce à la portance et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro, ce qui implique qu'une petite turbine

Savonius est très souvent présente sur son axe pour rendre possible le démarrage.

Ces solutions ont, jusqu'à présent, connu assez peu de succès en raison de certains incidents mécaniques survenus en particulier au pied du mât. Cependant, elles présentent des caractéristiques intéressantes (bonne valeur de coefficient de puissance C_p et indépendance de la direction du vent) et les progrès technologiques actuels pourraient laisser entrevoir un prochain regain d'intérêt.

Les deux problèmes majeurs de la Darrieus en forme de « batteur d'œufs » résident dans la fragilité de sa structure et par le fait que son mât soit haubané. Certains projets ont vu le jour pour corriger ces imperfections en particulier avec les rotors en forme de H, [11].

b) Eolienne Savonius

Le rotor de Savonius figure (Figure I.16) est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble comme sur (Figure I.16).



Figure I. 16: Turbine Savonius simple et son Principe de fonctionnement

Cette voilure à axe vertical se présente sous la forme d'un cylindre de faible diamètre. Elle est de ce fait complètement insensible à la direction du vent dans un plan horizontal. La valeur de la vitesse réduite peu élevée, offre des caractéristiques intéressantes du point de vue de l'acoustique et de la sécurité, cet aspect étant fortement lié à la vitesse linéaire en bout de pales. Toutefois, ces propriétés impliquent l'usage d'une génératrice à grand nombre de pôles et très souvent des machines sur mesure. Le démarrage à faible vitesse de vent est également un point fort. Ainsi, malgré une certaine faiblesse du coefficient de puissance (C_p 0.15 à 0.2), les avantages précédents auxquels s'ajoute une « certaine » esthétique en font une solution bien adaptée aux sites urbains. Le couple d'une turbine Savonius simple telle que celle de la (Figure I.15) présente un harmonique deux du couple et de la vitesse de rotation. Mais des constructions spéciales, comme le vrillage de la voilure, permettent de la minimiser. D'un point de vue mécanique, cet inconvénient peut poser des problèmes de vibrations et donc de résistance des matériaux.

Les dimensions géométriques d'une telle voilure sont cependant limitées. En effet, vu les efforts mécaniques devant être supportés par le mat, les éoliennes de type Savonius ne peuvent pas être de taille trop imposante. C'est pour cette raison qu'elles sont utilisées dans l'éolien de petite puissance. Un autre aspect très intéressant de ces voilures est qu'elles ont une forme assez esthétique, et peuvent être bien intégrées dans l'environnement urbain, [11].

I.4.2.3 Eoliennes installées en mer « éolienne offshore qui signifie hors côtes »

L'énergie éolienne n'est pas à proprement dire une énergie marine, mais son exploitation en mer présente des caractéristiques particulières, les vents y sont plus stables, avec une vitesse

moyenne de 8 à 9 m/s contre 6 à 7 m/s sur terre, le rendement meilleur, les risques sont très limités et la mer offre de grands espaces libres d'obstacles, où l'implantation des machines est possible en concertation avec les autres usagers de la mer, [14].

Les implantations d'éoliennes en mer permettent en outre de s'affranchir d'un certain nombre d'impacts, notamment sonores et visuels. Le choix des sites doit cependant respecter un certain nombre d'infrastructures ou d'activités existantes (zones militaires, zones de pêche, chenaux d'accès aux ports, câbles sous-marins...).

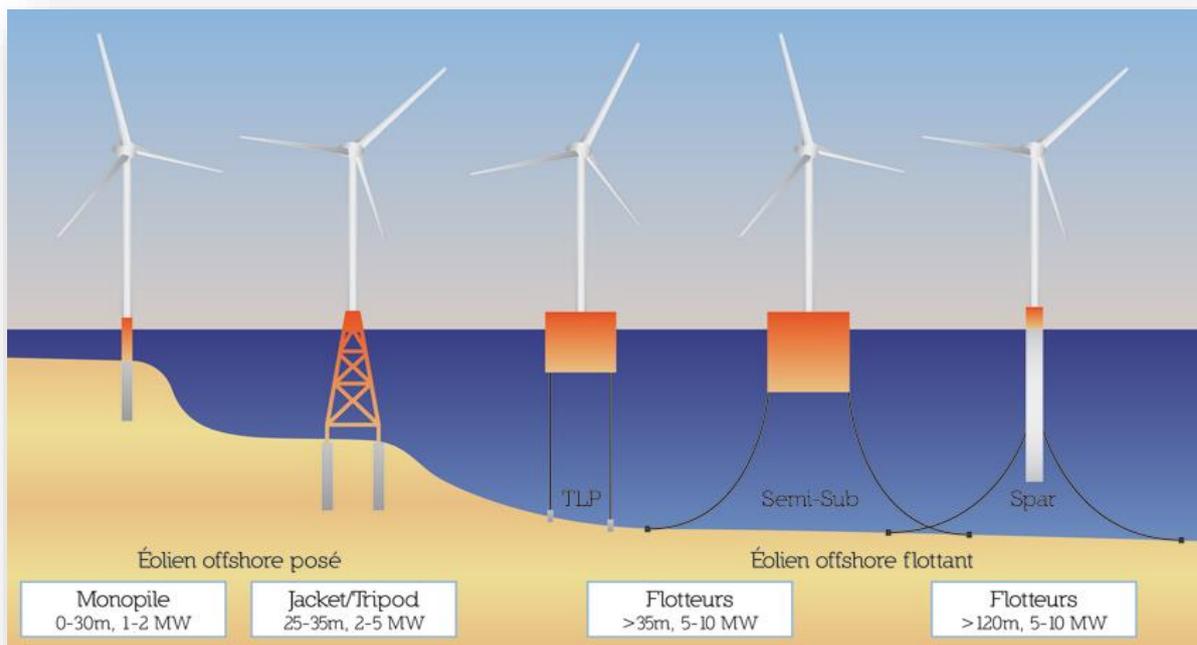


Figure I. 17 : Les différents types d'éolienne offshore

I.4.3 Comparaison :

Le Tableau I.1 résume les points forts et faibles de chaque type de turbine. Pour les applications à grande puissance les éoliennes à axe horizontal (EAH) dominent le marché grâce à leur fort rendement et leur accès au vent fort. Par contre, les éoliennes à axe vertical (EAV) sont plus appropriées pour les applications domestique en toit d'immeubles, vu que cela leur donne automatiquement accès au vent fort et qu'elles sont facilement abordables pour la maintenance.

Tableau I. 1 : Comparaison Des Eoliennes à Axe Horizontal, Et à Axe Vertical.

Types des Turbines	Avantages	Inconvénients
Eoliennes à Axe Horizontal (EAH)	<ul style="list-style-type: none"> + Fort rendement de conversion d'énergie + Accès au vent plus fort + Régulation de la Puissance viadécrochage et calage en cas de vent dépassant les limites nominales 	<ul style="list-style-type: none"> + Coût d'installation élevé, mat très dur qui doit supporter le poids de la nacelle. + Des câbles plus longs du haut de la tour jusqu'au la terre + Systèmes d'orientation requis
Eoliennes à Axe Vertical (EAV)	<ul style="list-style-type: none"> + Coût d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de la surface. + Fonctionnement indépendant du sens du vent. + Adéquat pour les toits de d'immeuble 	<ul style="list-style-type: none"> + Rendement moins faible + Fluctuation importante du couple et forte vibrations mécaniques + Solutions limitées pour la régulation en cas de rafale de vent.

I.5 Composants d'une éolienne

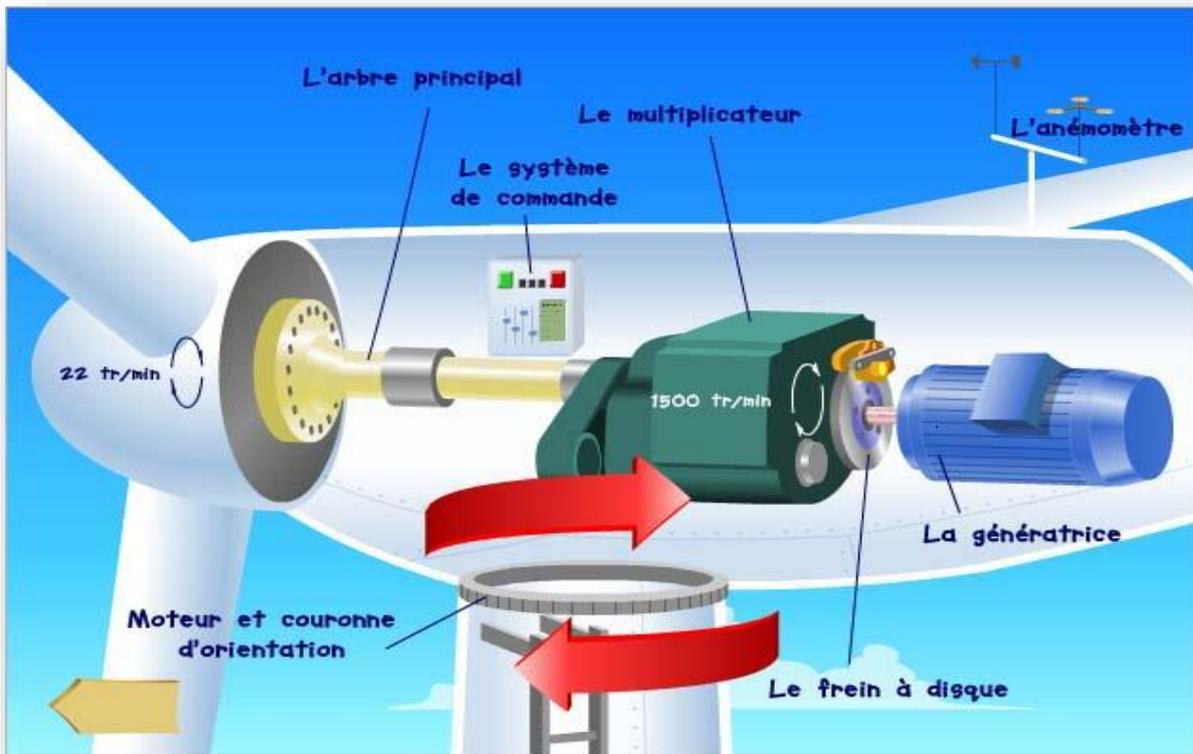


Figure I. 18 : les composantes de l'aérogénérateur.

- **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
- **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : relie les pales au multiplicateur.
- **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- **Tour ou le mât** : Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor, nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, pour capter le maximum d'énergie. Le mât peut être réalisé en acier roulé ou plié, protégé contre la corrosion ou bien en béton armé, [15].

- **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- **Refroidisseur** : Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile, [10].
- **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- **Girouette** : Permet de mesurer la direction du vent. Celle-ci est fixée sur un axe vertical à la base duquel se trouve une rose des vents, [20].
- **Anémomètre** : Fournit le module du vecteur vent (vitesse ou force du vent), on l'exprime en mètre/seconde ou en nœud ($1 \text{ nœud} = 0.515 \text{ m/s}$). Il existe plusieurs types d'anémomètre (à ultrason ou à laser, à fil chaud) mais l'anémomètre le plus utilisé c'est l'anémomètre à coupelle (moulinet) : Il est muni d'un rotor de trois coupelles en métal ou en plastique qui sous l'effet du vent se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse est enregistrée électroniquement, [20].
- Au pied du mât se trouve un transformateur.

I.6 Mythes et réalité sur l'intégration de l'éolien :

Si l'énergie du vent a été exploitée dès l'Antiquité par le truchement des moulins, les éoliennes modernes n'apparaissent qu'au début du XXe siècle (ou 20 e siècle). En effet, leur conception bénéficie alors de l'essor de l'aéronautique, qui entraîne une meilleure connaissance des vents et l'approfondissement de la mécanique et de l'aérodynamique de l'hélice, responsable de la propulsion de l'avion à hélice, mais également de la sustentation de l'hélicoptère et de certains ULM (par exemple l'Autogire). L'éolien reste cependant assez marginal jusqu'au premier choc pétrolier en 1973, qui pousse les Etats à investir dans des filières énergétiques indépendantes du pétrole. Ces derniers, motivés par des considérations d'ordre politique et économique, cherchent à sécuriser leurs approvisionnements électriques.

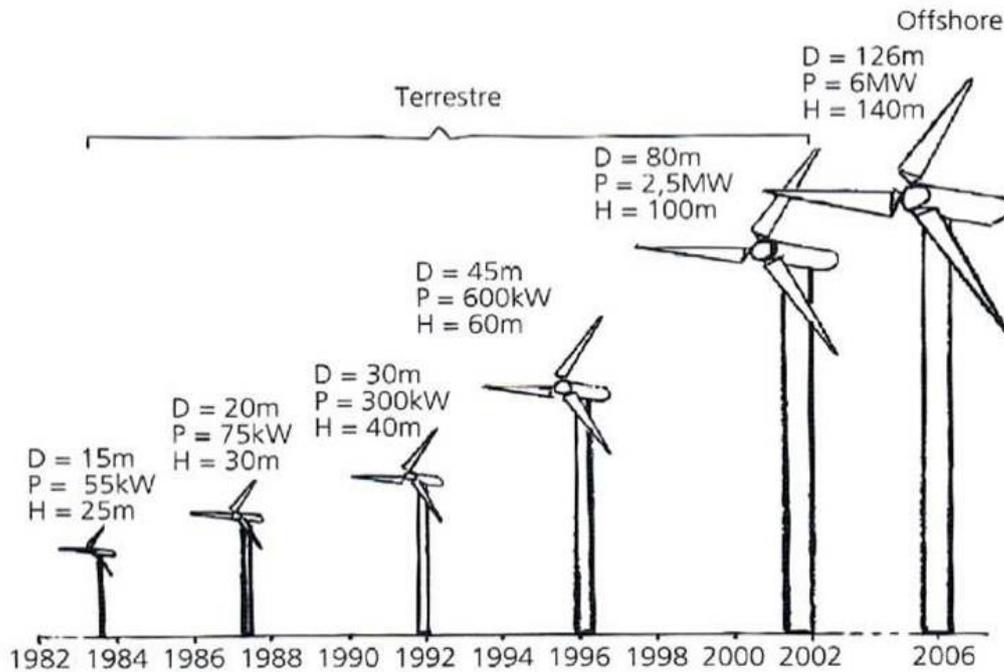


Figure I. 19: Evolution des caractéristiques d'une éolienne depuis 1984

I.7 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage

I.7.1 Systèmes Isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, [21]. Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes. Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

I.7.2 Systèmes Hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques, entre eux.

L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

I.7.3 Systèmes Liés au Réseau

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique

I.8 Synthèse des avantages et des inconvénients de l'éolien

a) Avantages :

- Sa matière première est « renouvelable » le vent est inépuisable.
- Elle est (le vent) gratuite.
- Elle ne génère, lorsqu'elle n'est pas assistée par une énergie fossile auxiliaire, aucun gaz à effet de serre (GES) en production.
- Sa souplesse d'utilisation en fait une ressource d'appoint durant les pics de consommation.
- Elle ne produit que peu de déchets toxiques.
- Elle est en grande partie recyclable (acier, béton) et est facilement démontable après sa durée de vie (estimée à une vingtaine d'années pour les éoliennes terrestres).
- La technologie est simple et éprouvée.

b) Inconvénients :

- L'énergie est intermittente (le vent est pratiquement imprévisible et l'éolienne ne fonctionne que dans une plage étroite de vitesse du vent)

- Les puissances unitaires sont très faibles, tant sur terre (2 MWH) que sur mer (6 MWH)
- L'intermittence et les faibles puissances impliquent que l'éolien ne peut être qu'une énergie d'appoint.
- Elle peut induire une nuisance sonore pour les riverains à une distance inférieure à 1500 mètres, selon l'Académie de médecine.
- Son fonctionnement crée des turbulences de l'air jusqu'à six fois le diamètre du rotor derrière elle.
- Nuisance visuelle, Outre l'esthétique que d'aucuns peuvent discuter.
- L'immobilier se déprécie à proximité d'un parc d'éoliennes.
- La réception des ondes électromagnétique (par exemple les radars) peut être perturbée par une ou plusieurs éoliennes.
- L'éolien offshore pose des problèmes de maintenance. En effet, on ne peut pas intervenir par bateau lorsque les vagues sont supérieures à 1,5 mètre.
- Une éolienne peut s'emballer à la suite d'un blocage du pas variable. En cas d'explosion, on peut retrouver des débris de pales à plusieurs centaines de mètres de distance.

I.8 Conclusion :

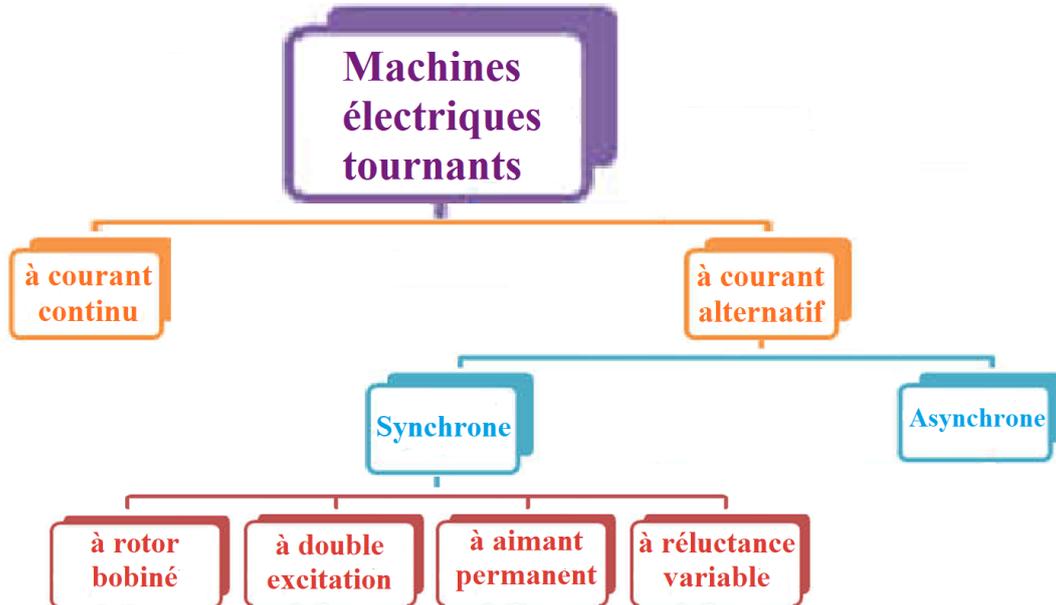
L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ce chapitre a été consacré aux énergies renouvelables en mettant l'accent sur système éolien qui représente une solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique, on a mis en évidence l'importance croissante de cette source d'énergie dans la transition vers un avenir plus durable et respectueux de l'environnement.

Modélisation et simulation de la MSAP

Chapitre II : Modélisation et simulation de la MSAP

II.1 Types des machines électriques dans les systèmes éoliens

Nombreuses sont les machines électriques qui peuvent être utilisées comme générateur



Pour une éolienne. On peut citer les machines asynchrones, synchrones et à courant continu. Dans l'industrie éolienne, les génératrices synchrones et asynchrones sont les plus utilisées. Il existe des génératrices synchrones à pôle lisse et à pôle saillant.

II.2 Introduction et historique

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants permanents soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [25].

Ce chapitre introductif va nous permettre d'aborder les différents travaux réalisés sur les machines synchrones en général, et sur les machines à aimants permanents (MSAP) en particulier.

Figure II. 1 : Les différentes classes des machines électriques.

Selon le principe de la classification de CHALMERS et de ses collègues, on peut arranger l'ensemble des machines synchrones comme l'indique la Figure (II.02), les machines

synchrones sont distinguées par la nature de leur excitation (bobinage, aimant permanent, etc.) et par le rapport de saillance $\xi=Lq/Ld$

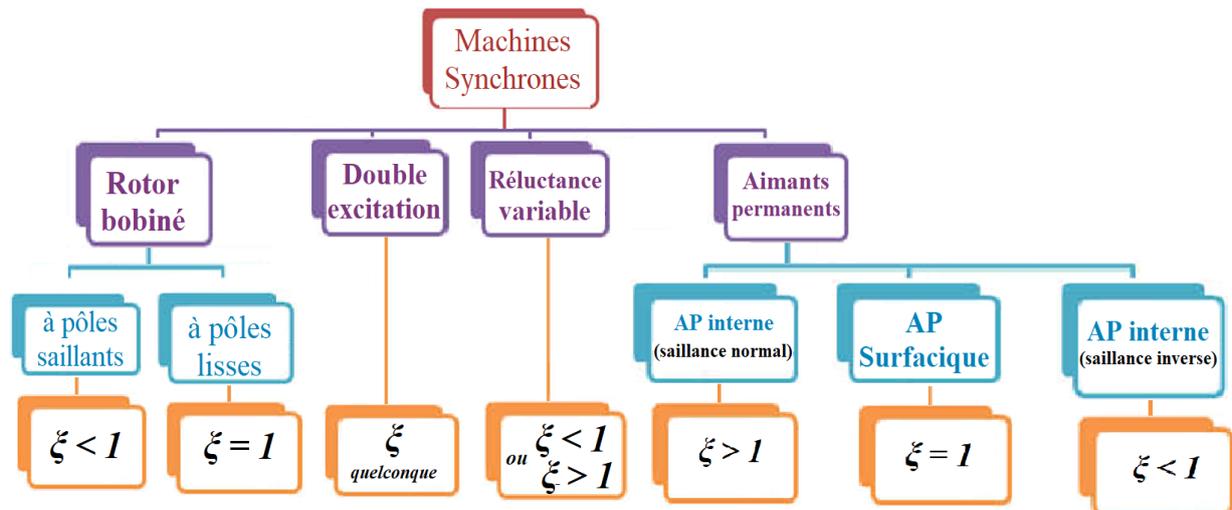


Figure II. 2 : Classement des machines synchrone.

II.2.1 Les génératrices synchrones

Les génératrices synchrones diffèrent de génératrices asynchrones, car elles tournent à la vitesse de synchronisme. Les machines asynchrones tournent légèrement en dessous de sa vitesse nominale. Génératrices synchrones sont compliquées à fabriquer et plus cher sur le marché, comparé aux génératrices asynchrones. Ces génératrices peuvent être à pôle lisse et à pôle saillant. Les machines à pôle saillant est surtout utilisée pour des applications qui nécessitent une faible vitesse de rotation. Les génératrices à pôle lisse sont utilisées pour des vitesses importantes. Les génératrices à pôle saillant trouvent leur application dans Les turbines hydraulique.[26]

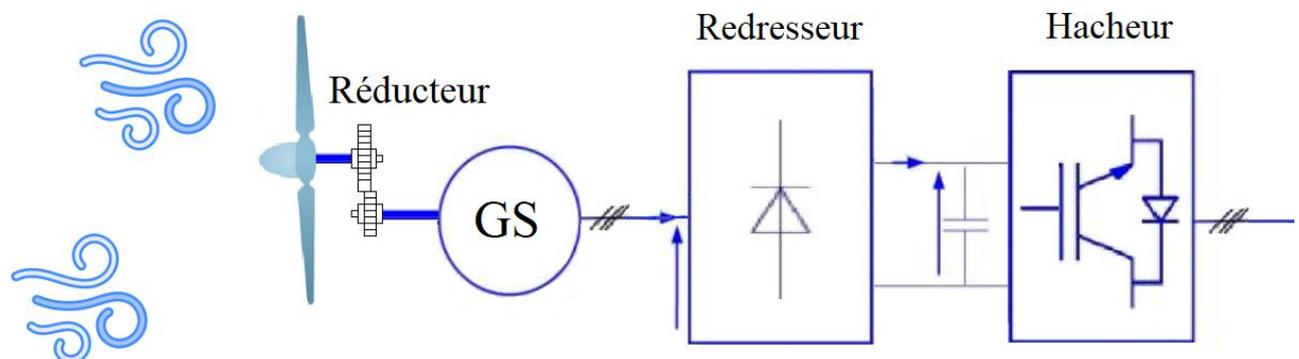


Figure II. 3 : système éolien basé sur la machine synchrone et Redresseur diode.

II.2.2 Le générateur synchrone à aimant permanent

L'apparition d'aimants performants et le développement des composants d'électronique de puissance sont les raisons qui ont poussé un bon nombre de chercheurs et industriels à se lancer dans des investigations dans le domaine des associations convertisseur statique machine synchrone à aimants permanents

La différence entre les machines synchrones classiques et les machines synchrones à aimant permanent c'est le remplacement de l'inducteur de la machine synchrone par un aimant permanent qui leur a procuré un certain nombre d'améliorations et avantages (inertie faible ; couple élevé...), par rapport aux autres types de machines (à courant continu, synchrone à excitation électrique et asynchrone).

Les machines synchrones à aimant permanent offrent la possibilité de couplage direct entre le rotor et l'éolienne de la MSAP sans réducteur de vitesse. Cette technologie résout les problèmes de l'éolienne fonctionnant à faible vitesse. [26]

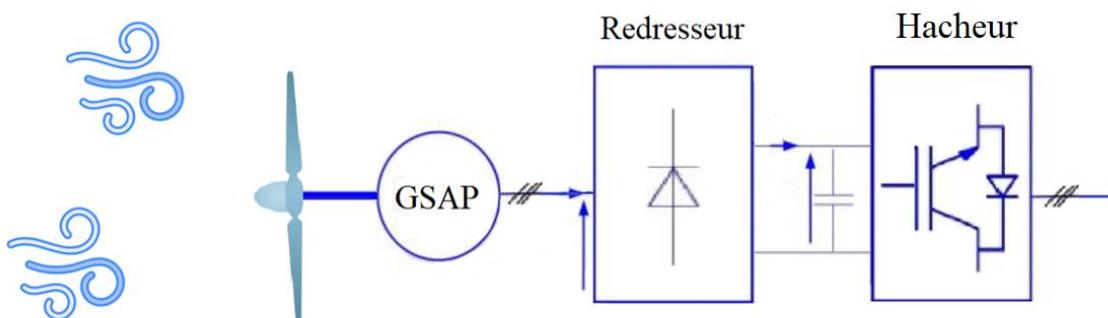


Figure II. 4: Système éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent.

II.2.3 Avantage de GSAP

La génératrice synchrone à aimants permanents qui offre un grand nombre d'avantages,

- Une haute efficacité énergétique.
- Une grande fiabilité.
- Une simplicité de mise en œuvre.
- Un bon rendement, du moins sur une certaine plage de vitesse

II.2.4 Les différents types d'aimants permanents

Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types [28,33]

Les Alnico : aimants permanents réalisés à partir d'un alliage Aluminium-Nickel-Cobalt. Caractérisés par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres. En effet, de part leur composition métallique ils sont le siège de pertes fer, et le procédé de fabrication induit une direction privilégiée de l'aimantation, qui est celle de la plus grande longueur. Actuellement, en raison de leur basse qualité, ils ne sont presque plus utilisés.

Les Ferrites : aimants permanents, formés de matériaux de la famille des céramiques et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques. Ils sont caractérisés par une faible induction rémanente mais ont un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie – prix.

Les alliages métaux – terres rares : ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage samarium–cobalt, caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés. A taille égale, la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus grande que celle des Alnico et six fois plus que celle des ferrites, réduisant ainsi de façon considérable le volume du rotor, ce qui permet donc d'augmenter le couple massique de la machine et de réduire son inertie. Leur prix est cependant élevé. Le choix de l'aimant est effectué en fonction de caractéristiques recherchées et du prix de l'aimant qui est très variable. Quelques propriétés magnétiques des différents types d'aimants sont données dans Figure (5 et 6) et le tableau II.1 ci-dessous.

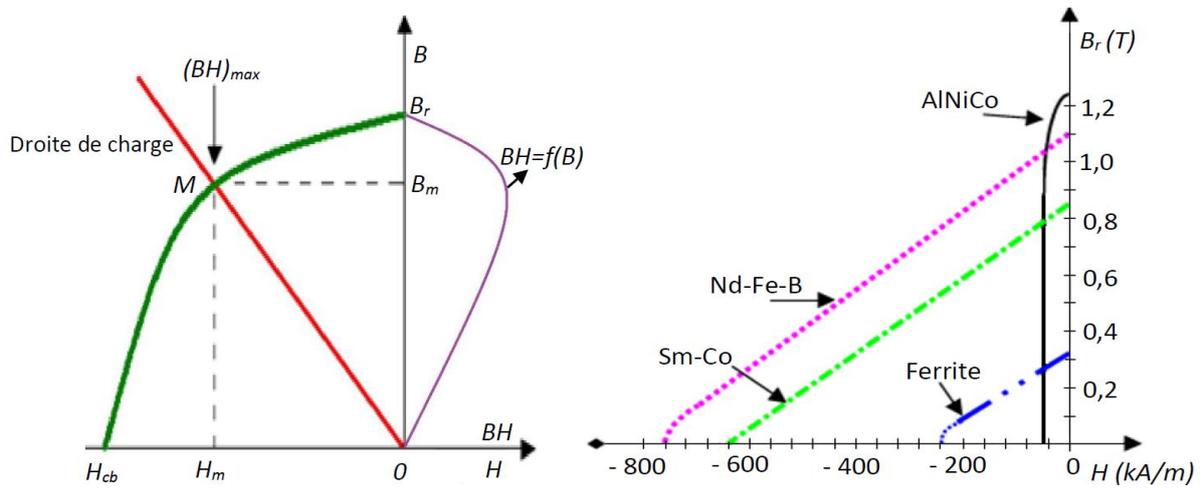


Figure II. 5 & 6 : Courbes de désaimantation des Principaux types d'aimants.

Le Tableau ci-dessous illustre les différents types d'aimant permanent

Tableau II. 1 : Les différents types d'aimant permanent

cType D'aimants	Densité d'énergie (BH) _{max} (kJ/ m ³)	Induction rémanente Br (T) à 25°C	Champ coercitif -H _c (kA/m)	Température T _{max} (°C)	Prix (€/kg)
NdFeB	200-380	1.2-1.5	900-2000	140-220	80-150
Sm Co ₅	140-200	1	2000	280	220
Sm ₂ Co ₁₇	180-240	1.05	2000	350-550	300
Alnico	50-85	1.1-1.3	130	550	45
Ferrites strontium	27-35	0.3-04	250	250	6
Ferrites baryum	8-30	0.2-04	170	100-240	4.5

II.2.5 Structures à flux radial

Les MSAP peuvent être construites avec plusieurs de configurations rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est le suivant :

- Aimants en surface ;
- Aimants insérés ;
- Aimants enterrés ;
- Aimants à concentration de flux.

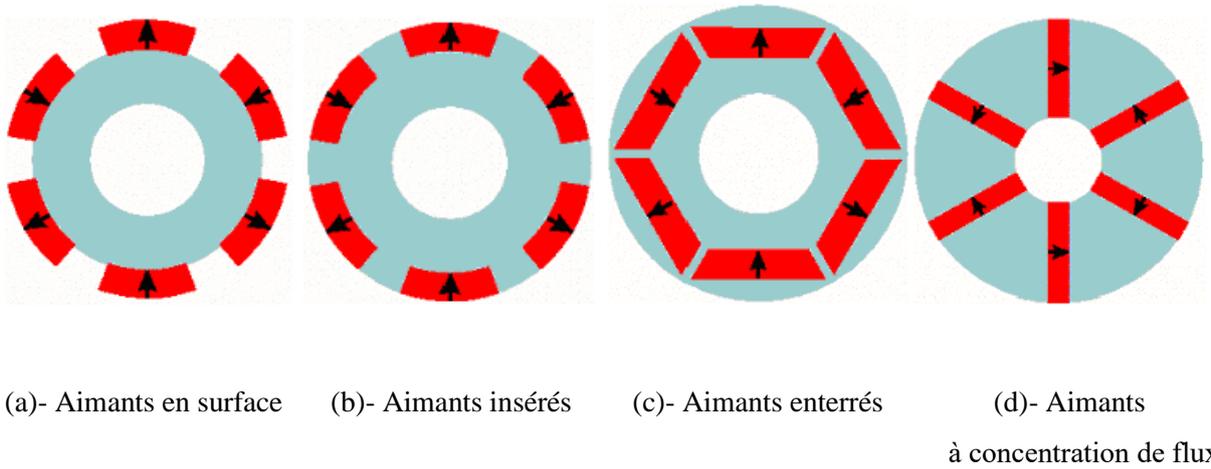


Figure II. 6 Configurations rotoriques des MSAP

Aimants en surface : Pour ces types de machines, les aimants sont placés sur la surface du rotor ; ils sont aimantés radialement, comme montré sur la figure (a). Cette configuration du rotor est la plus utilisée. Le principal avantage de ce type est sa simplicité donc faible coût de fabrication par rapport à d'autres machines à aimants. L'inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone et agir comme un amortisseur. Les réactances synchrones de l'axe $-d$ et l'axe $-q$ sont pratiquement les mêmes.

Aimants insérés (encastres) : Comme des machines avec aimants en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor, Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure (b). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réactant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe $-q$ est légèrement supérieure à celle dans l'axe $-d$.

Aimants enterrés : Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor figure (c) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle

magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe $-d$ est plus petite que celle de l'axe $-q$. Les aimants de cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses.

Aimants à concentration de flux : Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor et de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence figure (d). Les pôles magnétiques se forment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de flux provenant des aimants permanents. L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux généré par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe $-q$ est plus grande que celle de l'axe $-d$.

II.3 Modélisation de la GSAP

Un générateur synchrone à aimants permanents est caractérisé par un certain nombre de paramètres qui effectue son fonctionnement. Parmi lesquels certains paramètres non linéaire, qui complique le modèle mathématique de la machine, Pour cela la plupart de littérature propose quelques hypothèses simplificatrices afin de simplifier son modèle mathématique et de le rendre utilisable dans l'étude de comportement des générateurs.

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

- L'effet de la saturation du circuit ferromagnétique est négligeable
- La distribution sinusoïdale de le FMM crée par les enroulements du stator
- Les pertes par courants de Foucault et par L'hystérésis sont négligées
- L'effet de peau et celui de la température sur les résistances sont

Négligés.

- La distribution de la force magnétomotrice du stator est supposée Sinusoïdale.
- L'effet d'encochage est négligeable
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La machine synchrone à aimants permanents est représentée par **Figure (II.07)**

Elle se compose de trois enroulements statoriques décalés entre eux de $(2\pi/3)$, et des Aimants permanents qui créent l'excitation au rotor.

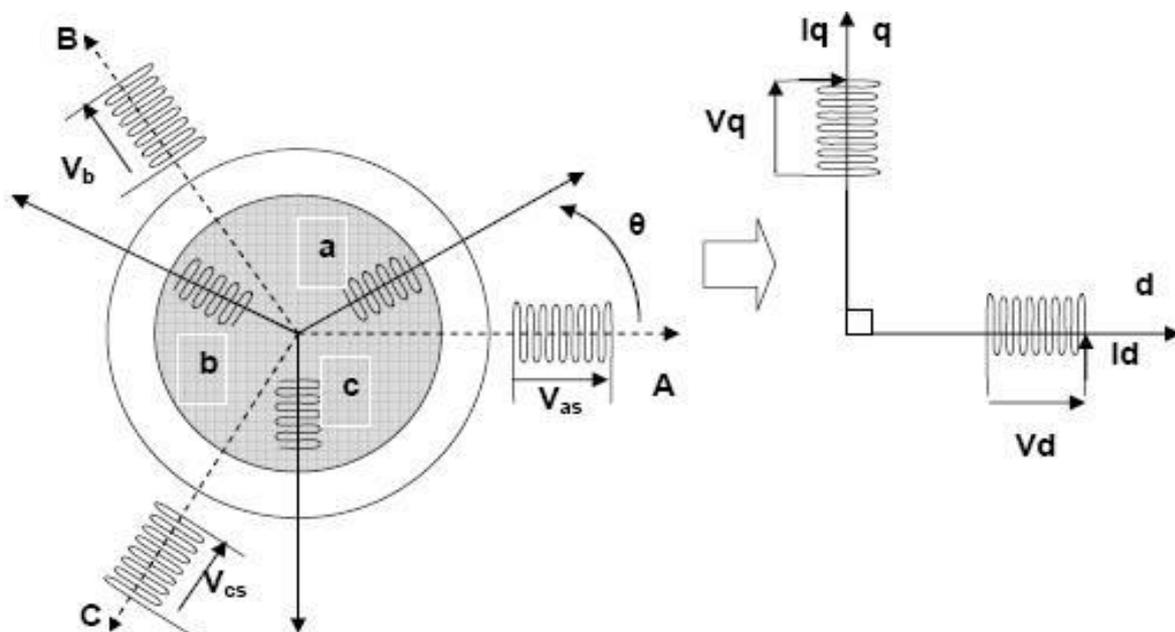


Figure II. 7: Machine équivalente au sens de Park.

II.3.2 Les équations de tension et flux

En adoptant les hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, les équations de la Machine synchrone triphasée sous forme matricielle s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 1})$$

La relation entre flux et courants sous forme réduite s'écrit :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{II. 2})$$

Avec : $V_s = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}$: vecteur tensions statoriques

$i_s = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$: vecteur courants statoriques

$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$: Résistances des enroulements statoriques

$\varphi_s = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}$: Vecteur flux des phases statoriques

Le vecteur des flux totalisés φ_s des phases statoriques s'écrit dans le repère lié au stator sous la forme matricielle condensée suivante :

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [\varphi_f] \quad (\text{II. 3})$$

II.3.3 Equation mécanique

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{(C_m - C_{em} - f \cdot \Omega)}{J} \quad (\text{II. 4})$$

Et

$$\omega = P \cdot \Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

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

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

F : Coefficient de frottement.

J : Moment d'inertie.

P : Nombre de paires de pôles.

On voit bien que les systèmes d'équations sont à coefficients variables en fonction de θ .

La résolution analytique dans ce repère reste très difficile.

II.3.4 Transformation de PARK

Pour contourner cette difficulté, on introduit la transformation de PARK qui permet le passage d'une machine triphasée alimentée en alternatif et produisant un champ magnétique tournant à un modèle biphasé lié au rotor de grandeurs électriques continues permettant de produire le même champ (**Figure (II.08)**) [27].

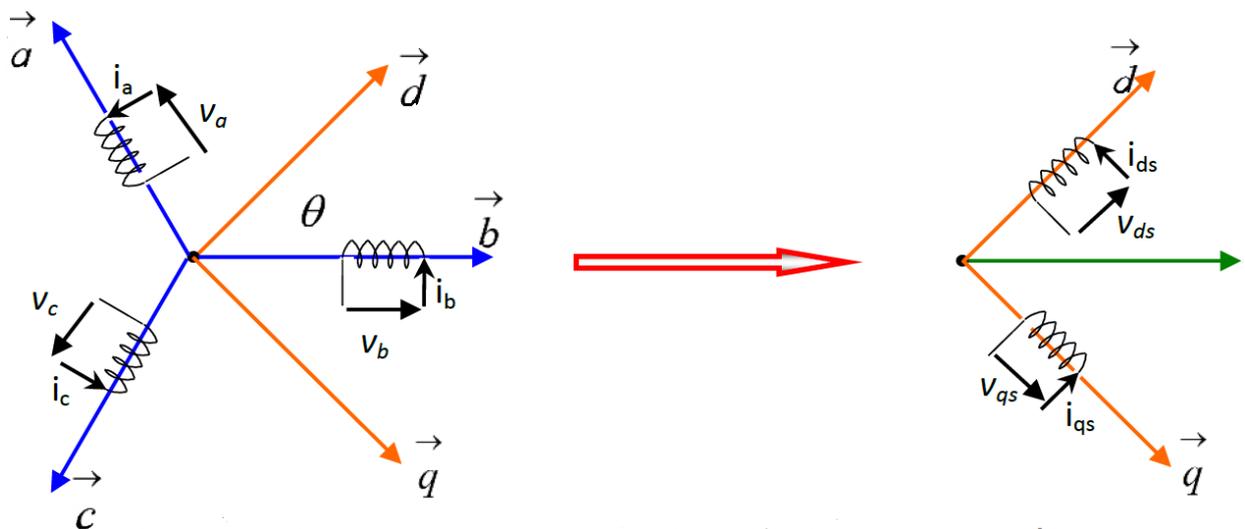


Figure II. 8 : Passage de repère triphasé (abc) au diphasé (d q).

On note que :

- d, q : Indices des composantes de Park directe et en quadrature.
- $P(\theta)$: Matrice de passage de Park.

La matrice de passage notée $P(\theta)$ est la suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

II.3.4.1 Passage triphasé au biphasé

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

X : représente soit le courant soit la tension soit le flux.

II.3.4.2 Passage biphasé au triphasé

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

X : représente soit le courant soit la tension soit le flux.

La matrice de la transformation inverse de PARK est la suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 9})$$

II.4 Modélisation de la GSAP dans Repère de Park

La transformation de PARK s'exprime par la relation suivante :

$$[X_{dq0}] = P(\theta) \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II. 10})$$

La transformation inverse de PARK est la suivante :

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [X_{dq0}] \quad (\text{II. 11})$$

L'indice « 0 » désigne la composante homopolaire, direct et quadrature.

II.4.1 Equations électriques

En appliquant la transformation de Park aux équations Simultanées, on peut représenter tous les vecteurs de repères associés au rotor. si θ est l'angle électrique qui donne la position du rotor par rapport au stator.

En utilisant la conversion génératrice ; en inverse le sens du Courant i_d et i_q dans

Le repère de Park, on peut écrire les équations sur la forme :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} + \omega \phi_q \\ V_q = -R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega \phi_d \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + \phi_f \\ \phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II. 13})$$

Où : L_d : Inductance suivant l'axe (d)

L_q : Inductance suivant l'axe (q)

ϕ_f : le flux d'induction.

En remplaçant le flux par leurs valeurs, on trouve :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q \cdot \omega \cdot i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - (L_d \cdot i_d + \phi_f) \omega \end{cases} \quad (\text{II. 14})$$

II.4.2 Expression de la puissance et du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} exprimé comme la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} = p \frac{dw_e}{d\theta_e} \quad (\text{II. 15})$$

w_e : Energie emmagasinée dans circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport aux stator).

P : Nombre de pair de Pole.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est comme suite :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (\text{II. 16})$$

On remplace V_q et V_d par leur expression, donnera :

$$p(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s (i_d^2 - i_q^2) - (i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_d}{dt}) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_q i_q - \varphi_d i_d) \right] \quad (\text{II. 17})$$

Avec :

$-\frac{3}{2} R_s (i_d^2 - i_q^2)$: Représenter la puissance dissipée en pertes joule dans les enroulements de stator.

$\frac{3}{2} (i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_d}{dt})$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les roulements du stator

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

Sachant que :

$$P(t) = C_{em} \cdot \omega \quad \text{et} \quad C_{em} = \frac{3}{2} P (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{II. 18})$$

On peut l'écrire en fonction des inductances L_d et L_q directe et en quadrature comme suit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_q \cdot i_d - \varphi_f i_q] \quad (\text{II. 19})$$

P : nombre de pair de pôles.

Pour une MSAP bipolaire ($p=1$) et a rotor lisse ($L_s = L_d$) on aura le couple suivant

$$C_{em} = \frac{3}{2} \varphi_f i_d = \frac{3}{2} \varphi_f i_q \quad (\text{II. 20})$$

II.5 Simulation et interprétation

II.5.1 Simulation MSAP : mode moteur

D'après les équations précédentes, on peut établir le modèle du MSAP sous forme d'état

$$\begin{aligned}\frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} (V_d - R_s i_{sd} + \omega \cdot L_q \cdot i_{sq}) \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} ((V_q - R_s i_d - \omega(L_d \cdot i_d + \varphi_f)) \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{(C_m - C_{em} - f \cdot \Omega)}{J}\end{aligned}\quad (II.21)$$

Le système peut être mis sous forme d'équation d'état :

$$[\dot{X}] + [A][X] + [B][U] \quad (II.22)$$

$$[X] = [i_d \ i_q]^t, \quad [V] = [V_d \ V_q \ \varphi_f]^t \quad (II.23)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & \omega \left(\frac{L_q}{L_d} \right) \\ -\omega \left(\frac{L_d}{L_q} \right) & \frac{-R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & \frac{-\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

On peut écrire matrice [A]et[B] sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_q} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_q} \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

La Figure ci-dessous représente le schéma bloc de simulation du moteur alimenté par des tension sinusoïdales à 50Hz

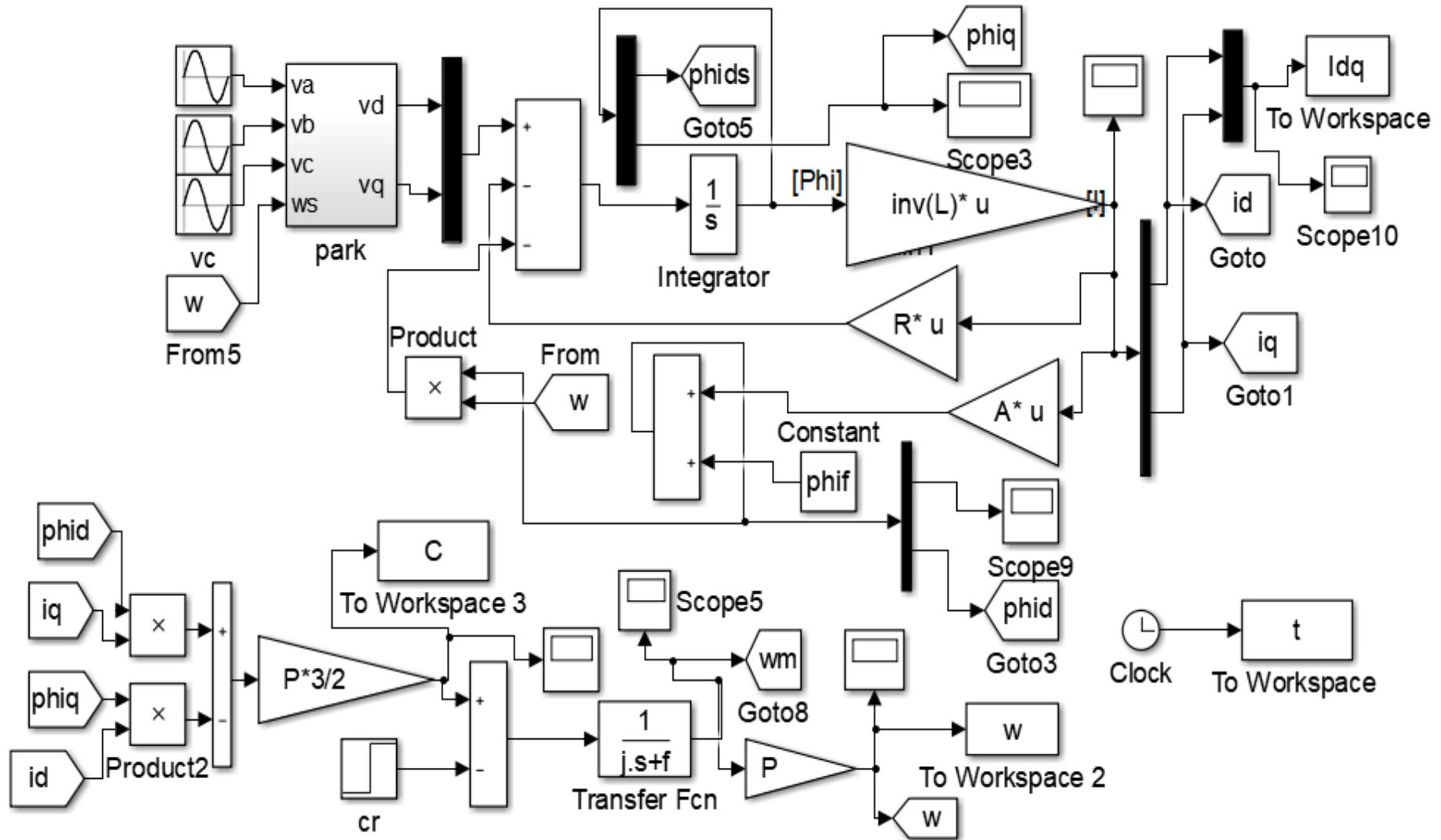


Figure II. 9 : Schéma bloc du moteur synchrone à aimants permanents.

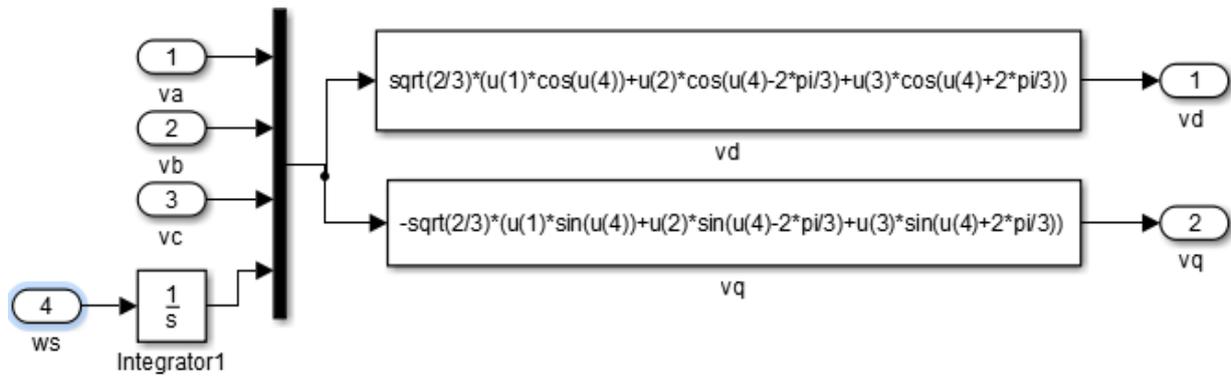


Figure II. 10 : Transformation de Park.

II.5.1.1 Fonctionnement en charge

Pour le fonctionnement en charge on applique un couple résistant $C_r=10$ N.m sur la machine MSAP et les autres paramètres sont comme suite

$$R_s=0.6 \Omega;$$

$$L_d=1.4e-3 \text{ H};$$

$$L_q=2.8e-3 \text{ H};$$

$$f=0.0014 \text{ N.s/m}^2;$$

$$j=0.02 \text{ Kg.m}^2;$$

$$p=4;$$

$$\varphi_f =0.2 \text{ Wb};$$

II.5.1.2 Résultat de simulation

On obtient donc les figures suivantes :

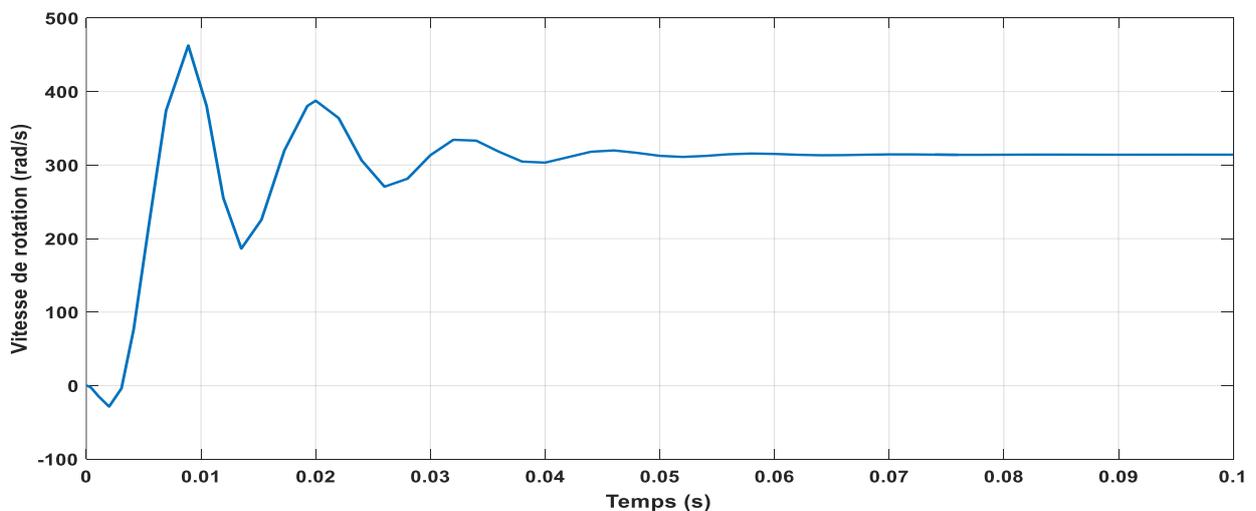


Figure II. 11 : Vitesse de Rotation

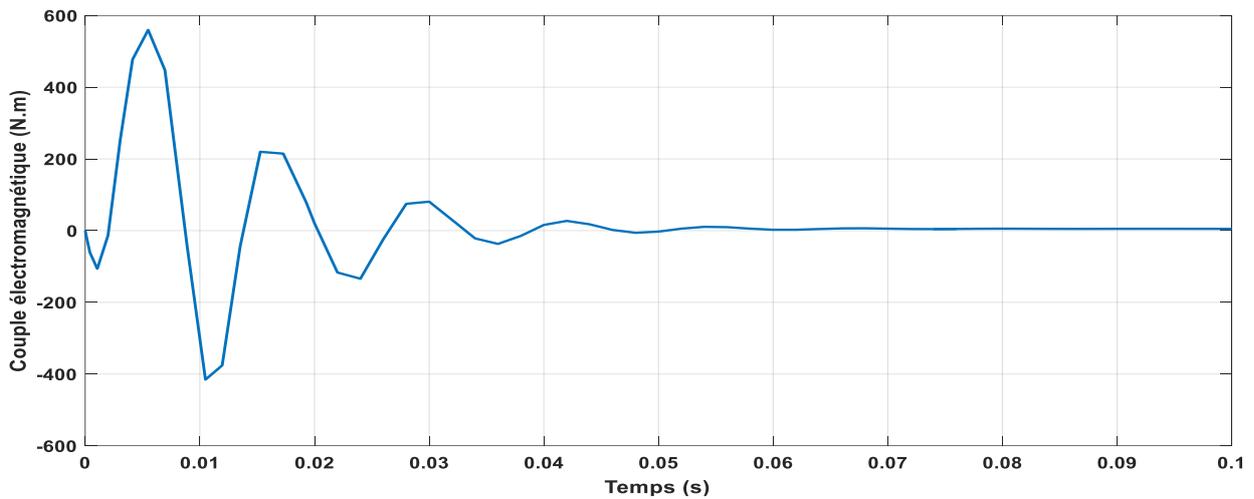


Figure II. 12 : Couple électromagnétique.

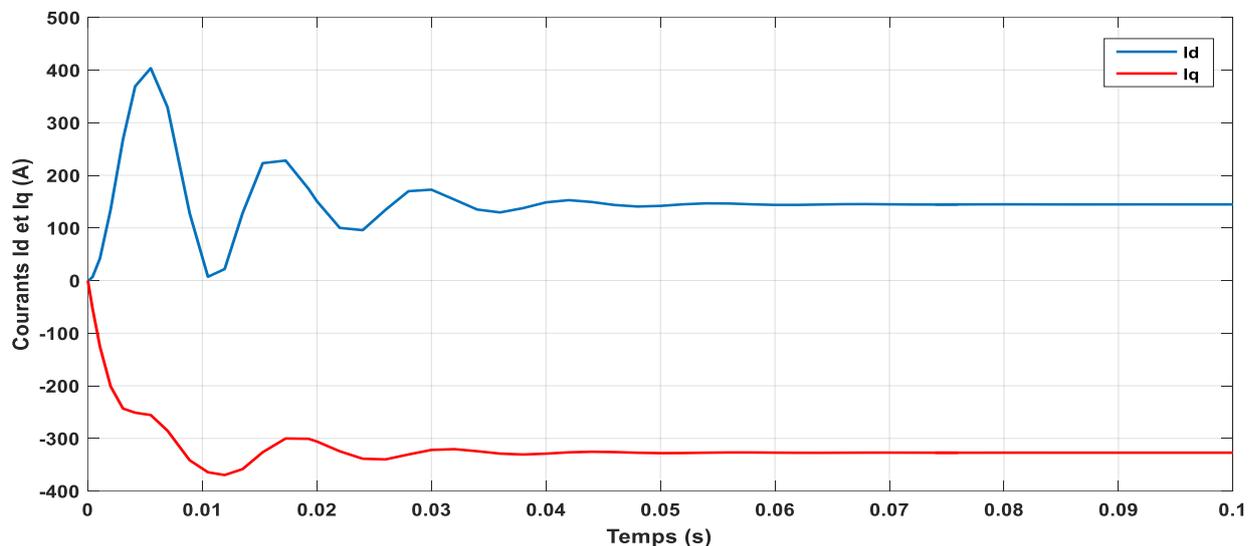


Figure II. 13 : Courants statoriques Id et Iq.

II.5.1.3 Interprétations des résultats

En pratique, le moteur synchrone à aimants permanents est toujours associé, lors de son fonctionnement, à un convertisseur statique. Dans ce cas les excès d'oscillations dans les caractéristiques du couple et de courant ne sont pas observés.

Les résultats présentes ci-dessus ne sont que des tests théoriques pour valider le modèle de la machine.

Les figure (II.11, II.12, II.13) montrent le comportement de la MSAP lors de l'application d'une charge de 10 N.m, on voit que la vitesse prend des pics importants au démarrage, mais se stabilise au synchronisme.

Au démarrage les courants sont caractérisés par des pics très importants qui après le régime transitoire de 0.06 s, tendent vers leur valeur efficace.

II.5.2 Simulation MSAP : en mode Génératrice

II.5.2.1 Fonctionnement en charge

La génératrice alimente une charge électrique (R_{ch} , L_{ch}). Pour obtenir les tensions et les courants résultant de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique les expressions des tensions (II. 14) données par :

$$\begin{cases} V_d = -R_s \cdot i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q \cdot \omega \cdot i_q \\ V_q = -R_s \cdot i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - (L_d \cdot i_d + \varphi_f) \omega \end{cases} \quad (II. 27)$$

D'autre part, l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} \cdot i_d + L_{ch} \frac{di_d}{dt} - L_{ch} \cdot \omega \cdot i_q \\ V_q = R_{ch} \cdot i_q + L_{ch} \frac{di_q}{dt} + L_{ch} \cdot \omega \cdot i_d \end{cases} \quad (II. 28)$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (II.22), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch}) \cdot i_d + (L_q + L_{ch}) \cdot \omega \cdot i_q] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch}) \cdot i_q - \omega(L_d + L_{ch}) \cdot i_d + \varphi_f \cdot \omega] \end{cases} \quad (II. 29)$$

En introduisant la transformée de LAPLACE dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} Si_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch}) \cdot i_d + (L_q + L_{ch}) \cdot \omega \cdot i_q] \\ Si_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch}) \cdot i_q + (L_d + L_{ch}) \cdot \omega \cdot i_d + \varphi_f \cdot \omega] \end{cases} \quad (II. 30)$$

Considérons le flux d'excitation φ_f comme grandeur de commande, et les courants I_d , I_q Comme variables d'état.

Equations d'état:

$$[\dot{X}] = [D][X] + [B][U] \quad (II. 31)$$

$$[X] = [i_d \ i_q]^t, \quad [U] = [0 \ \varphi_f]^t \quad (II. 32)$$

On peut écrire la matrice [D] comme suit :

$$[D] = [A] + \omega[C] \quad (\text{II.33})$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Et [B] sous la forme :

$$[B][U] = \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

A partir des expressions (II.30 à II.33) et en faisant appel à l'expression du mouvement, on peut construire le bloc de simulation de la génératrice (Figure II.14).

nous avons simulé le modèle de la machine synchrone à aimant permanent par l'outil Simulink, et nous avons relevé le comportement de la vitesse, du couple électromagnétique, tension statorique et du courants statorique .

Paramètre :

$R_s=0.895 \Omega$ $L_d=0.012 \text{ H}$ $L_q=0.0211 \text{ H}$ $f=0.001 \text{ N. s/m}^2$ $j=0.00141 \text{ Kg.m}^2$ $p=3$ $\varphi_f=0.9 \text{ Wb}$ $R_{ch}=60 \Omega$ $L_{ch}=0.002 \text{ H}$

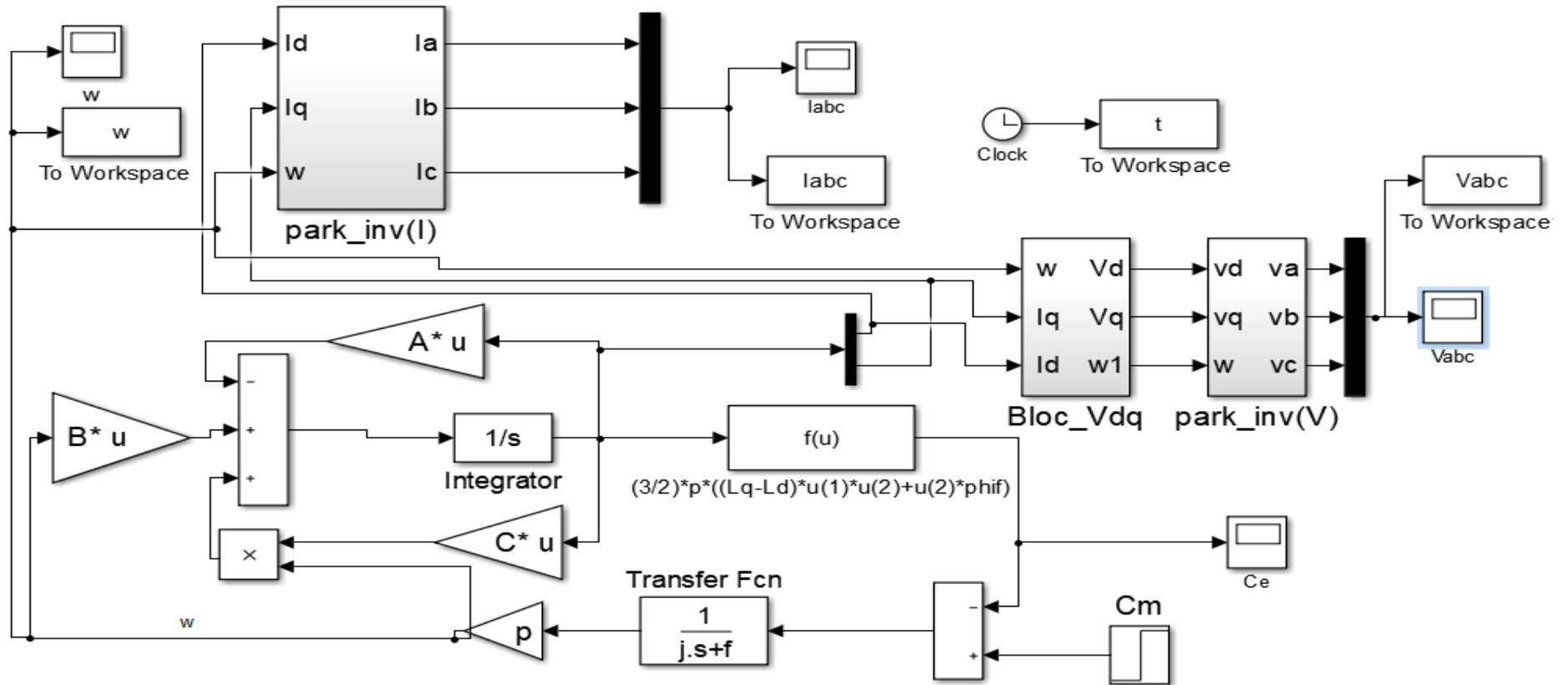


Figure II. 14 : Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents.

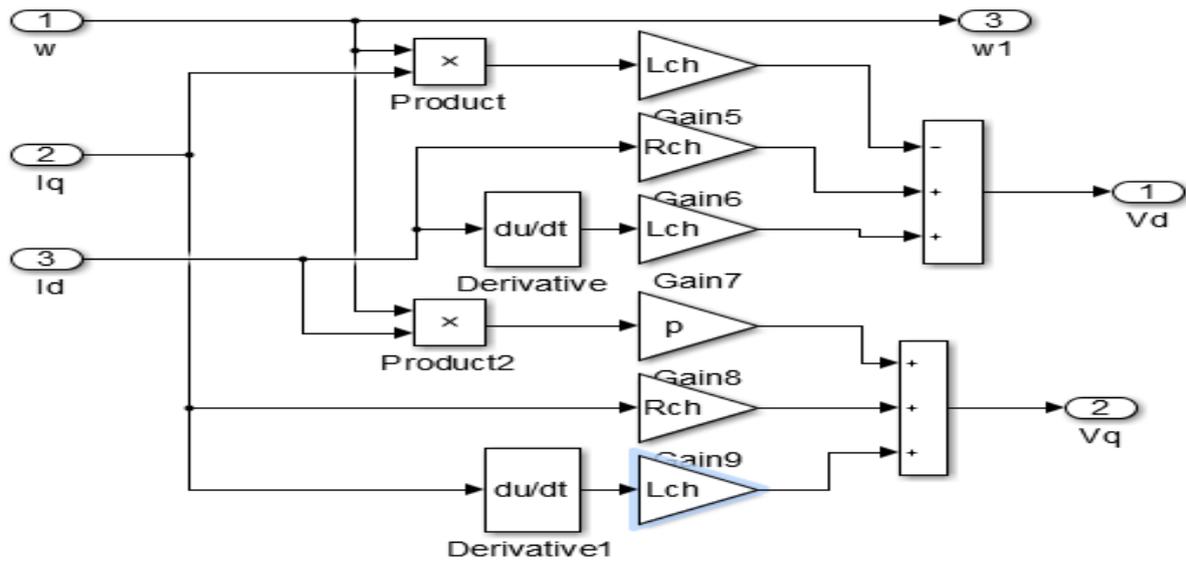


Figure II. 15 : Tension V_d et V_q

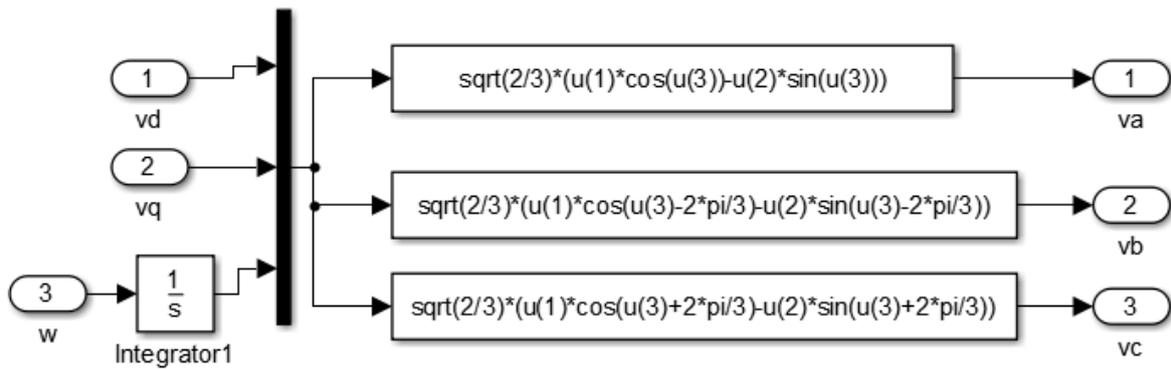


Figure II. 16 : Transformation de Inverse de Park

II.5.2.2 Résultat de simulation

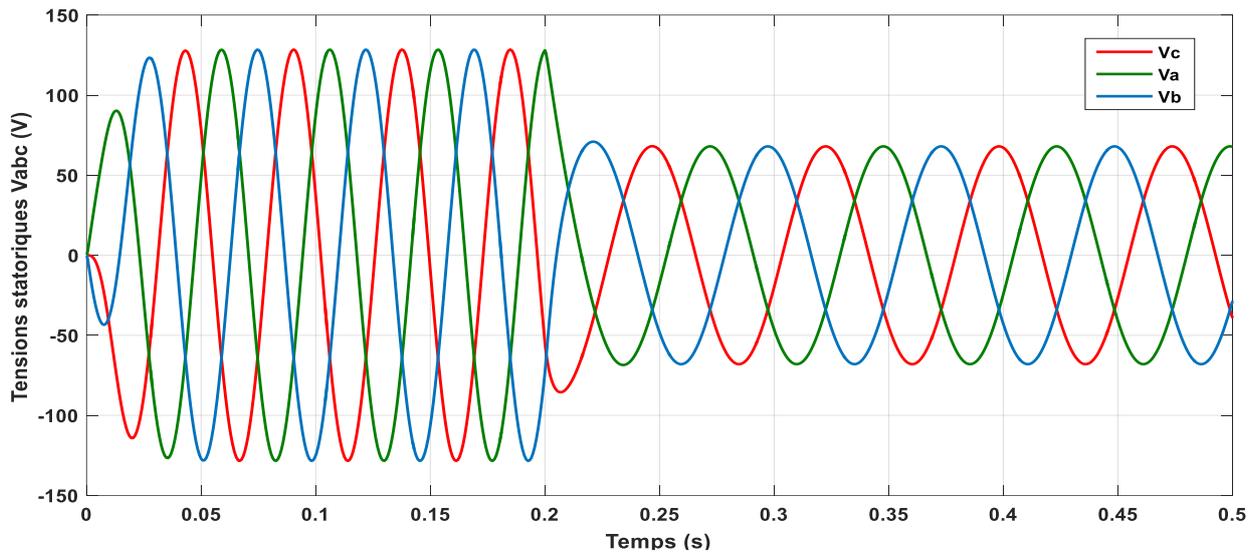


Figure II. 17 Figure II.18: Tensions statoriques V_{abc} .

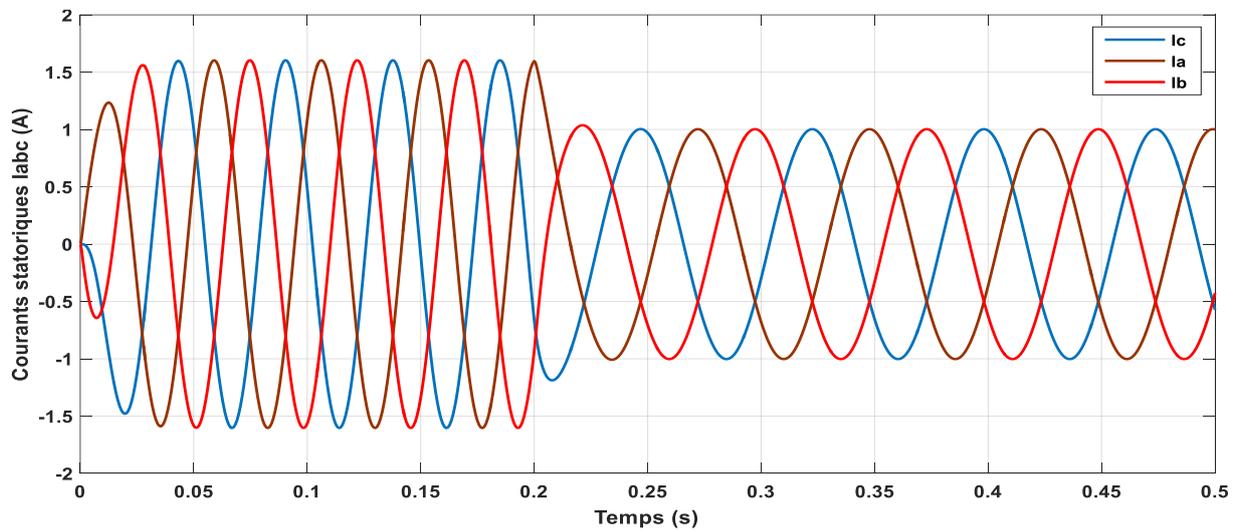


Figure II. 18 : Courants statoriques I_{abc} .

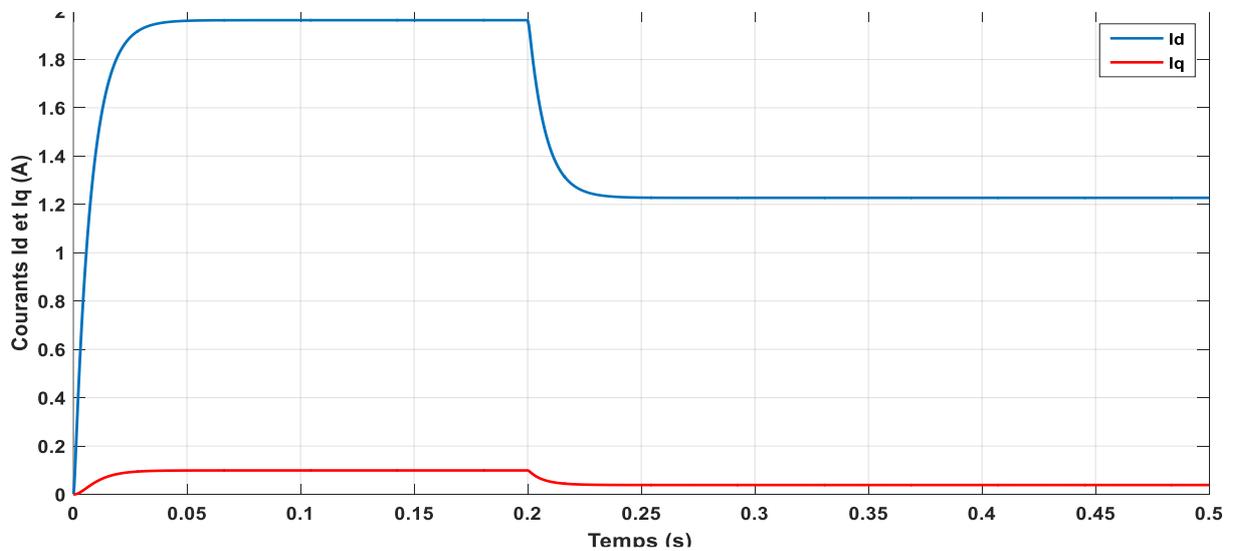


Figure II. 19 : Courants I_d et I_q

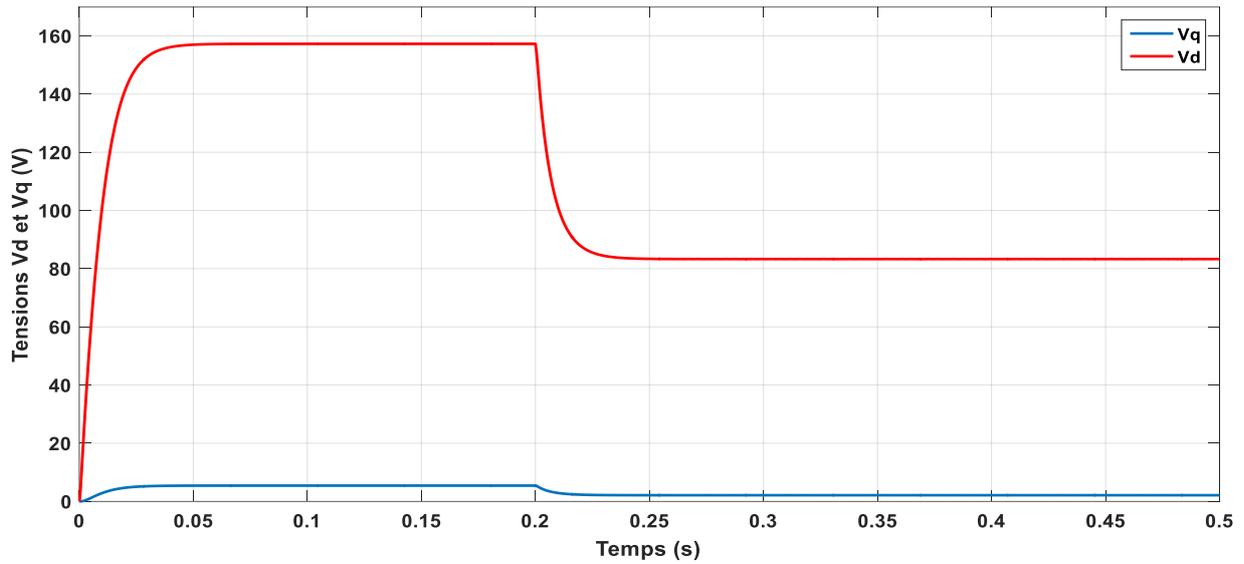


Figure II. 20 : Tensions statoriques V_d et V_q

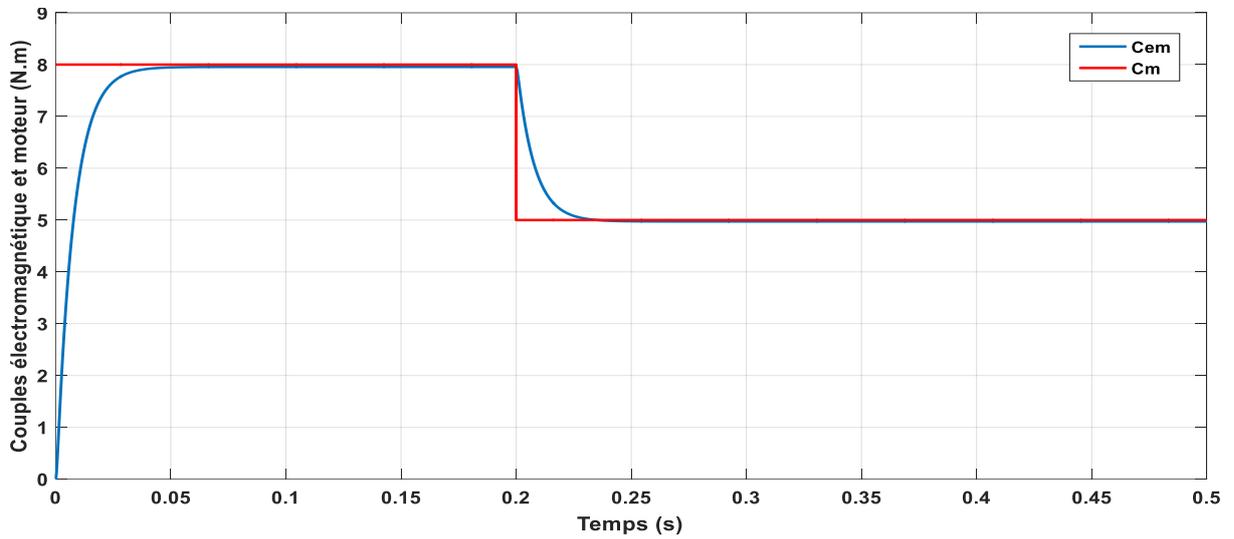


Figure II. 21: Couples électromagnétique et moteur

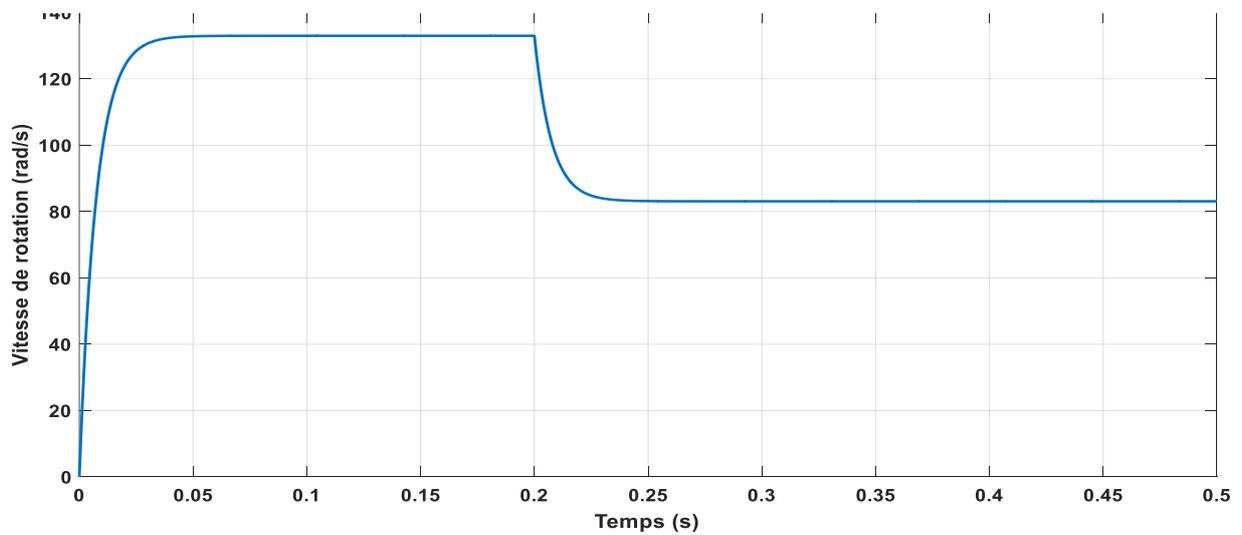


Figure II. 22 : Vitesse de rotation

II.5.2.3 Interprétation des résultats

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (Figures II.14). On constate que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par de faibles tensions et courants représentés sur les figures (Figure.II.19) et (Figure.II.20). Cela s'explique par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 8 N.m, à 4 N.m, la vitesse de rotation passe de 132.90 rad/s à 83 rad/s. La tension et le courant diminuent respectivement de 128.40 V à 68 V et de 1.6 A à 1 A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité les différentes structures de la machine synchrone à aimants permanents. Ensuite on a montré qu'à l'aide de la transformation de Park, le modèle devient plus simple et les non-linéarités sont réduites au nombre de trois.

Les équations obtenues par la transformation de Park engendrent des phénomènes identiques aux phénomènes liés à la machine à courant continu, ce qui confirme l'analogie entre les deux modèles. En fin, nous avons présenté la simulation de la MSAP mode moteur et en mode génératrice GSAP en charge pour voir le fonctionnement et la robustesse de la machine.

Modélisation et Simulation De La Turbine Eolienne

Chapitre III : Modélisation et simulation de la turbine éolienne

III.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pâles de l'éolienne).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans cette partie un modèle analytique de la turbine éolienne est décrit ainsi que l'identification des différents paramètres qui régissent le fonctionnement de cette dernière à savoir le coefficient de puissance (C_p), l'angle de calage (β) et la vitesse spécifique du vent (λ)[25].

III.2 Conversion de l'énergie éolienne

III.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (Figure III.1) s'écrit [26] :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad (\text{III. 1})$$

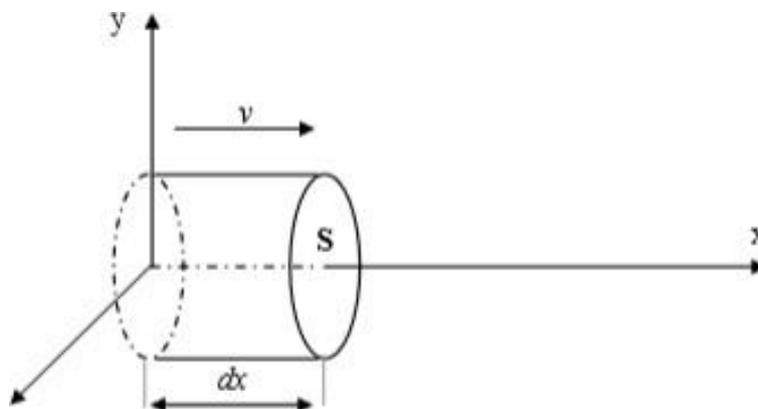


Figure III. 1 : colonne d'air animée d'une vitesse v .

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps. En supposant $dx = vdt$, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho s_0 v^3 \quad (\text{III. 2})$$

ρ : masse volumique de l'air (en Kg/m^3).

v : vitesse instantanée du vent (en m/s). $dx = vdt$

E_c : En joules

III.2.2 Loi de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 59% de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formulala loi de Betz pour la première fois. Considérons le système de la Figure III.2 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval [25].

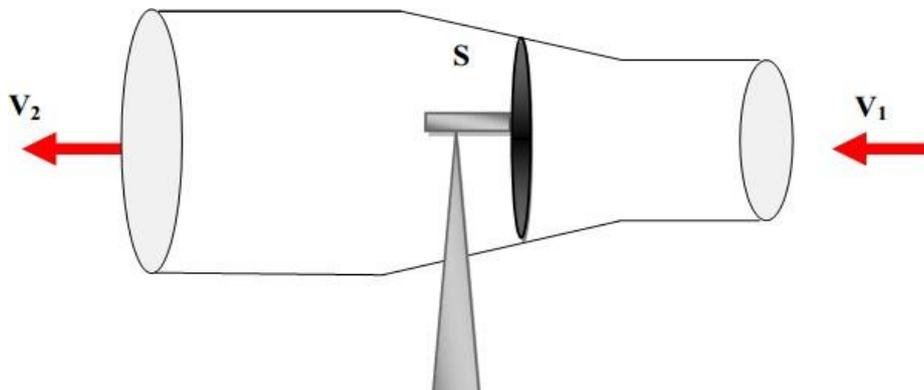


Figure III. 2 : Tube de courant autour d'une éolienne.

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [2].

$$m_0 = \frac{\rho s (v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{III. 03})$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et enaval [26]

$$P_m = \frac{m_0(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (\text{III.04})$$

En remplaçant m_0 par son expression dans (III.04) :

$$P_m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (\text{III.05})$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $v_2=0$ dans l'expression (II.05) :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{III.6})$$

III.2.3 La vitesse spécifique ou normalisée

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\Omega_t R_t$ sur la vitesse instantanée de vent V (Figure III.3) et donné par l'expression suivante [27].

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V} \quad (\text{III.07})$$

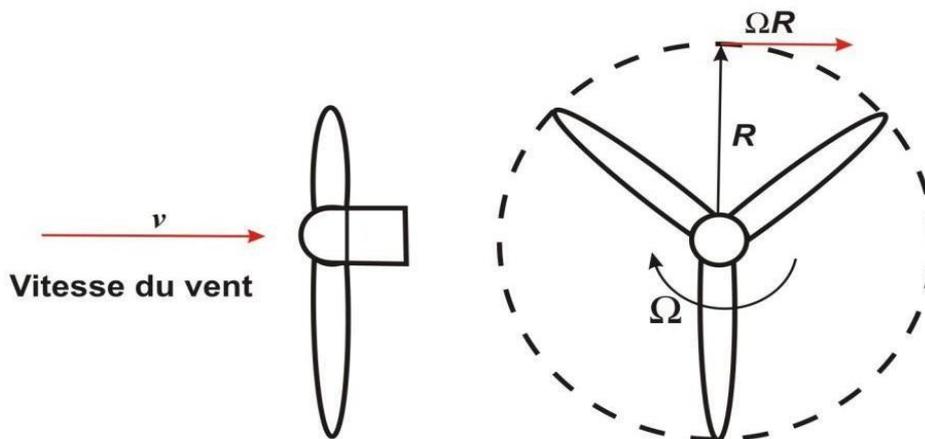


Figure III. 3 : Vitesse du vent V et vitesse tangentielle Ωt et R_t .

R_t : Rayon de la surface balayée en m.

V : Vitesse de vent en m/s.

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicatrice en rad/s

III.2.4 Coefficient de puissance :

Le coefficient C_P caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. Le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [26] [27].

Le coefficient C_p est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse Spécifique λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de $\frac{16}{27}$ soit 0,593.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique [27] :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{Pmax} \quad (\text{III. 08})$$

$C_{P \max}$ étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} [26].

III.2.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle [26][27].

En combinant les équations (I-06), (I-07), et (I-08), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R_t^2 V^3 \quad (\text{III. 09})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{III. 10})$$

D'où :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{P_t P_m}{\lambda v} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \rho \pi R_t^3 V^2 \quad (\text{III. 11})$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R_t V^2} \quad (\text{III. 12})$$

T_t : couple de la turbine éolienne.

III.2.6 Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur G , et à partir des équations (I-09) et (I-10) l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_t R}{G V_1} \right) \rho \pi R_t^2 V^3 \quad (\text{III. 13})$$

Cette expression permet d'établir un réseau de courbes donnant cette puissance en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent (figure I-5) [28].

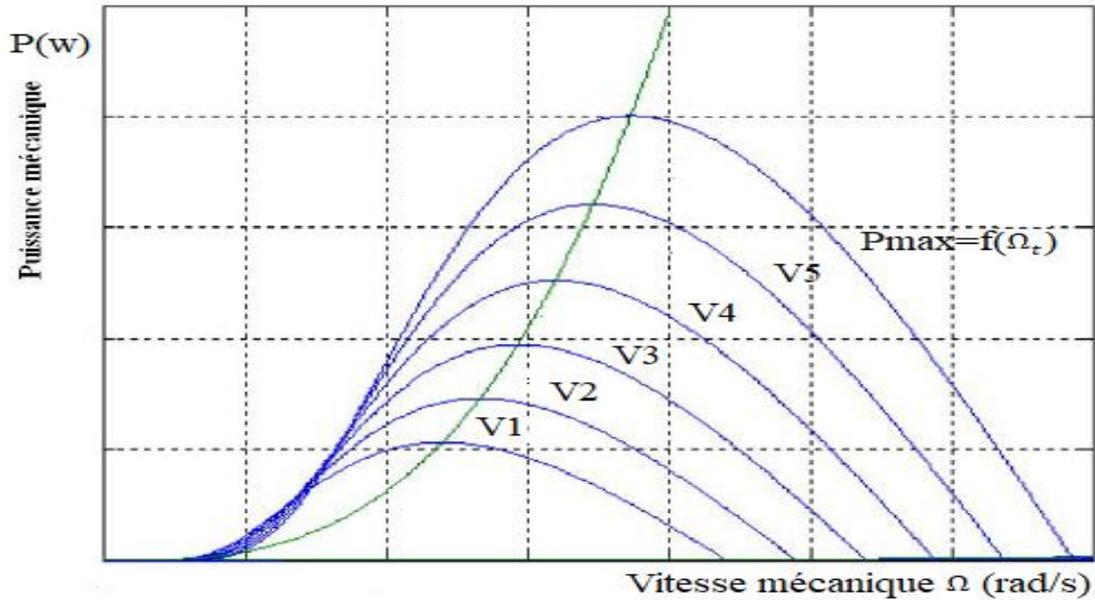


Figure III. 4 : puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent

Au regard de la courbe repérée PM, qui joint les points de puissances maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser le transfert de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner à vitesses variables.

Au regard de la courbe repérée P_M , qui joint les points de puissances maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser le transfert de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner à vitesses variables.

III.3 Modélisation du système éolien

III.3.1 Introduction

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine.

Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

Le système mécanique de l'éolienne est composé de quatre organes :

- 1- Trois pales considérées de conception identique et ayant les mêmes paramètres à savoir l'inertie J_{Pale} , élasticité K_b , et coefficient de frottement d_b . Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées β_{b1} , β_{b2} , β_{b3} . Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [29].
- 2- L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :
 - Son inertie J_h
 - Son élasticité k_h
 - Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h
- 3- Le multiplicateur de vitesse, de gain
- 4- Le rotor de la génératrice possède :
 - Une inertie J_g
 - Un coefficient de frottement d_g

III.3.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✚ La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- ✚ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air (d_b) est très faible et peut être ignoré.
- ✚ Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.
- ✚ On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple (figure I-6).
- ✚ Le système étudié est composé d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur entraînant une génératrice à travers un réducteur de vitesse de gain G [25].

III.3.3 Modèle de la turbine

Les variables d'entrée et sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.
- Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlées en variant les quantités d'entrées précédentes.[30]

III.3.4 Modèle du multiplicateur

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

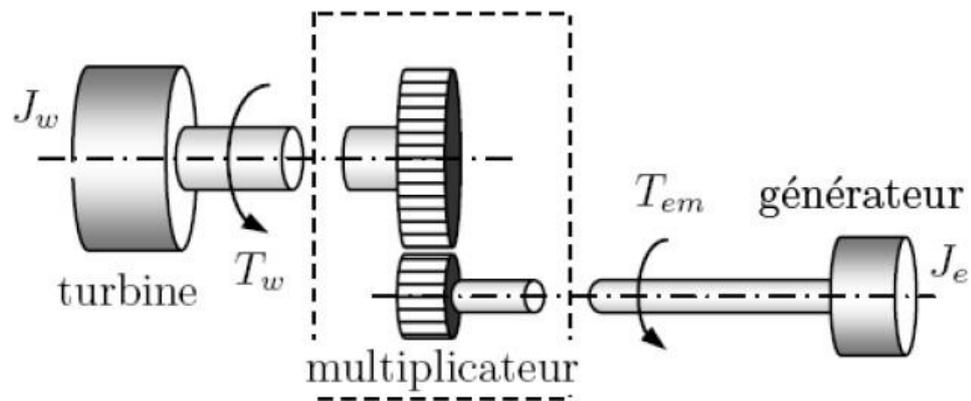


Figure III. 5: Schéma du système éolien.

$$\Omega_{mec} = G\Omega_{tur} \quad (III. 14)$$

Avec :

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

Ω_{tur} : La vitesse de la turbine.

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [26].

$$C_{mec} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (III. 15)$$

Avec :

G : rapport de multiplication.

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

C_{aer} : Couple aérodynamique.

III.3.5 Modèle de l'arbre

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

$$J_T \frac{\partial \Omega_{mec}}{\partial t} = C_T - C_{vis} \quad (III. 16)$$

Le couple de frottement visqueux est modélisé par :

$$C_{vis} = f_T \Omega_{mec} \quad (III. 17)$$

Avec :

J_T : Inertie totale des parties tournantes (Kgm²).

f_T : Coefficient de frottements

visqueux total. Le couple total

de l'éolienne est donné par :

$$C_T = C_{mec} + C_{em} \quad (III. 18)$$

C_{em} : Couple électromagnétique de la GSAP.

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

$$J_T = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_g \quad (III. 19)$$

III.3.6 Modélisation de la batterie

Le système de stockage de batterie est utilisé pour stocker l'excès d'énergie lorsque la puissance générée par l'éolienne est supérieure à la puissance de charge requise, et pour maintenir l'équilibre de puissance entre la puissance générée et la puissance de charge requise lorsque la puissance générée par l'éolienne est inférieure à la puissance de charge requise.

Le modèle électrique utilisé dans ce travail est présenté à la figure (III.6).

Ce modèle est décrit par deux éléments : une source de tension E_{bat} (la force électromotrice en fonction de l'état de charge de la batterie (SOC)) et la résistance interne R_{bat} . Selon la convention du récepteur, l'équation principale est donnée par :

$$U_{bat} = E_{bat} + R_{bat} \cdot I_{bat} \quad (\text{III. 20})$$

Où : U_{bat} et I_{bat} sont respectivement la tension et le courant de la batterie.

L'état de charge (SOC) est défini comme le rapport de la charge électrique Q que la batterie peut fournir au courant I , par rapport à la capacité nominale de la batterie Q_0 [25-27] :

$$\text{SOC} = \frac{Q}{Q_0} \quad (\text{III. 21})$$

En supposant qu'il n'y ait pas de réactions secondaires, la relation entre SOC et le taux de charge/décharge est donnée par :

$$\frac{d\text{SOC}}{dt} = \frac{i}{3600 \cdot C_{bat}} \quad (\text{III. 22})$$

La capacité de la batterie C_{bat} est donnée par [26,27] :

$$C_{bat} = C_{10} = \frac{1,67}{1 + 0,67 \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0,9}} (1 + 0,005 \times \Delta T) \quad (\text{III. 23})$$

Où : ΔT est l'échauffement de l'accumulateur ; C_{10} est la capacité de la batterie lors d'un régime de décharge à courant constant pendant 10 heures :

$$C_{10} = 10 \times I_{10}$$

Les équations décrivant le comportement de la batterie en fonction de son régime de charge et de décharge sont les suivantes :

$$\begin{cases} U_{bat_{ch}} = (2 + 0,16 \times SOC) + \frac{I_{bat}}{C_{10}} (1 - 0,025 \times \Delta T) \left(\frac{6}{1 + I_{bat}^{0,86}} + \frac{0,48}{SOC^{1,2}} + 0,036 \right) \\ U_{bat_{ch}} = (1,965 + 0,12 \times SOC) - \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} (1 - 0,007 \times \Delta T) \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{SOC^{1,5}} + 0,02 \right) \end{cases} \quad (III. 24)$$

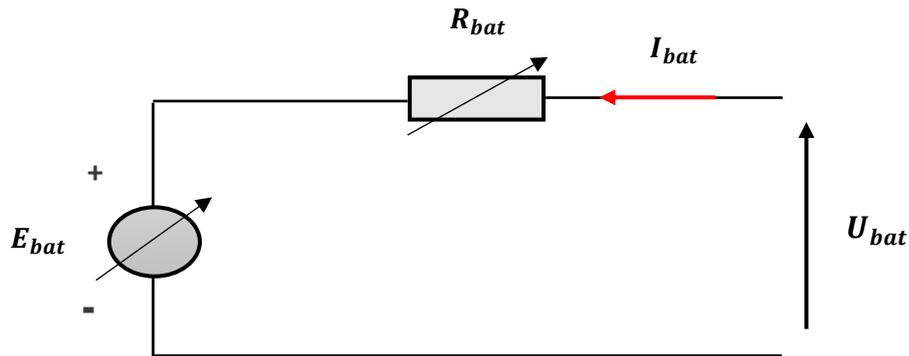


Figure III. 6 : Circuit équivalent d'une batterie plomb-acide.

Les paramètres de la batterie :

$$R_{bat} = 0,756 \Omega$$

$$X_{bat} = 0,072 \Omega$$

$$C_{bat} = 2,2 \text{ mF}$$

Dans ce modèle, le système de stockage est composé de 16 batteries d'acide de 12 V, 60 Ah interconnectées en série afin de fournir une tension de 192 V.

Le schéma équivalent du modèle de batterie plomb-acide est présenté à **la figure III.6.**

III.4 Simulation de la chaîne de conversion (GSAP + Batterie + Charge) :

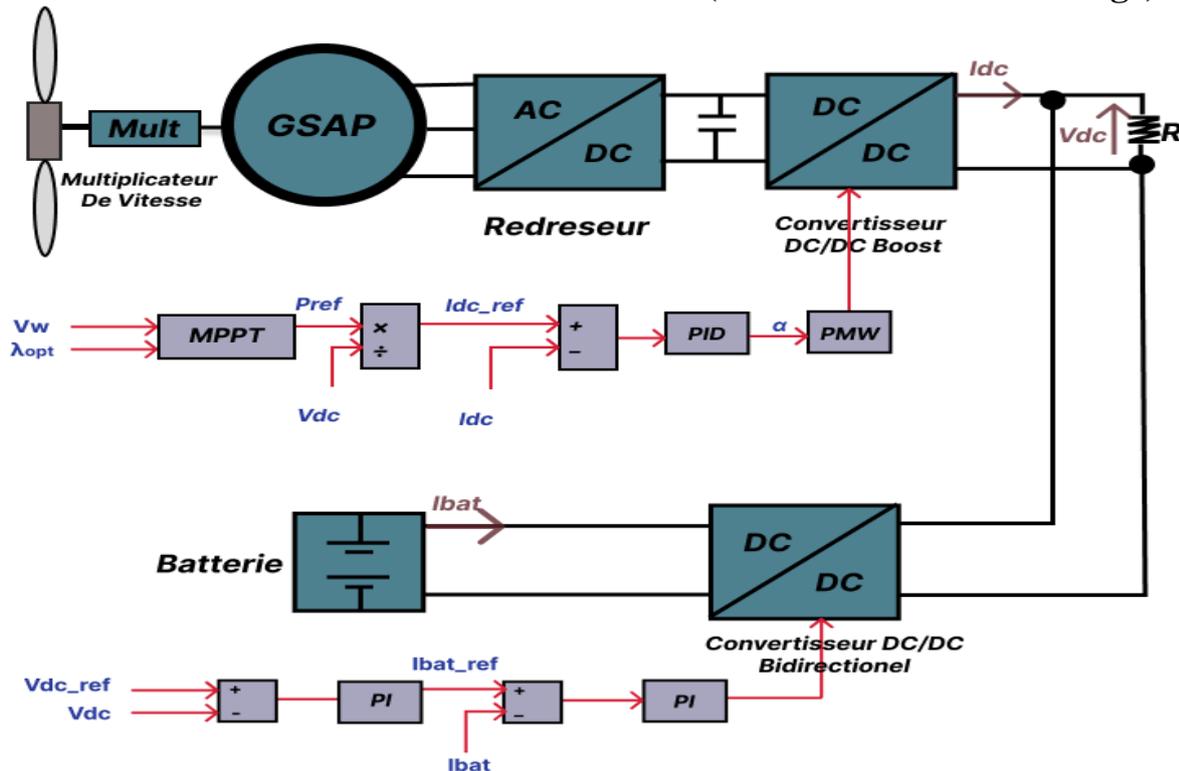


Figure III. 7 : Le modèle de simulation et sa commande.

III.4.1 Méthode de recherche du point maximum de puissance

Nous allons présenter dans ce point, une stratégie de commande de la turbine éolienne en zone d'extraction de la puissance maximale : commande directe de la vitesse ou commande avec asservissement de vitesse où on contrôle la vitesse mécanique par un régulateur PI

Le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale [5].

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but une commande spécifique connue sous la terminologie : **Maximum Power Point Tracking (MPPT)** correspond à la zone II doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

On distingue deux approches possibles :

1. La première approche, la moins classique, considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue.
2. La deuxième approche, plus répandue, suppose que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est connue.

Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

III.4.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :

Cette stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, nous allons utiliser un asservissement de vitesse.

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Un régulateur PI suffit pour répondre à ce cahier des charges.

Cette commande nécessite l'utilisation d'un régulateur de vitesse. Nous avons procédé à la simulation de la turbine en utilisant les équations données précédemment.

Les conditions de simulation sont les suivantes :

1. $C_{p_{max}} = 0.428$: c'est le coefficient de puissance maximum.
2. $\lambda_{opt} = 2.25$ est la vitesse relative maximale.
3. Le schéma de simulation doit permettre de commander la vitesse rotation de sorte à maintenir les valeurs maximales de C_p et λ quel que soit la vitesse du vent. Pour cela nous allons utiliser un contrôleur de vitesse (régulateur PI) [8].

Finalement on obtient le schéma bloc du modèle de la turbine éolienne et de la commande de la vitesse mécanique présenté sur la figure (III.7)

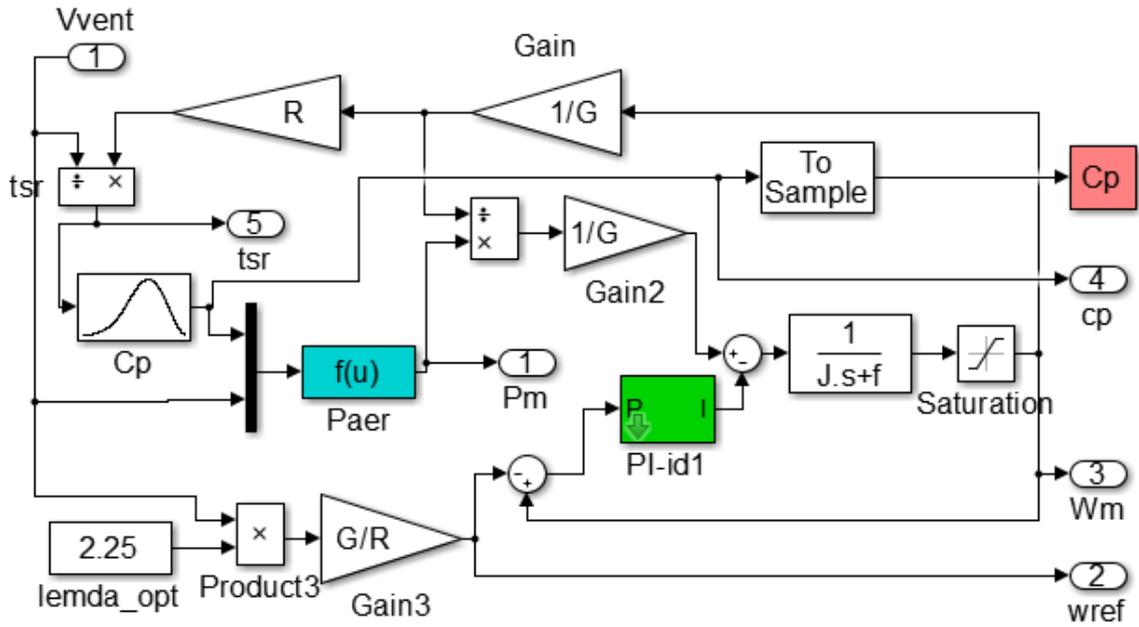


Figure III. 8 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne (Matlab – Simulink).

La figure (III.9) ci-dessous représente le coefficient de puissance de la turbine en fonction la vitesse spécifique λ , comme la courbe le montre, lorsque λ prend sa valeur optimal $\lambda_{opt}=2.25$ le C_p est à sa valeur maximal $C_p= 0.428$.

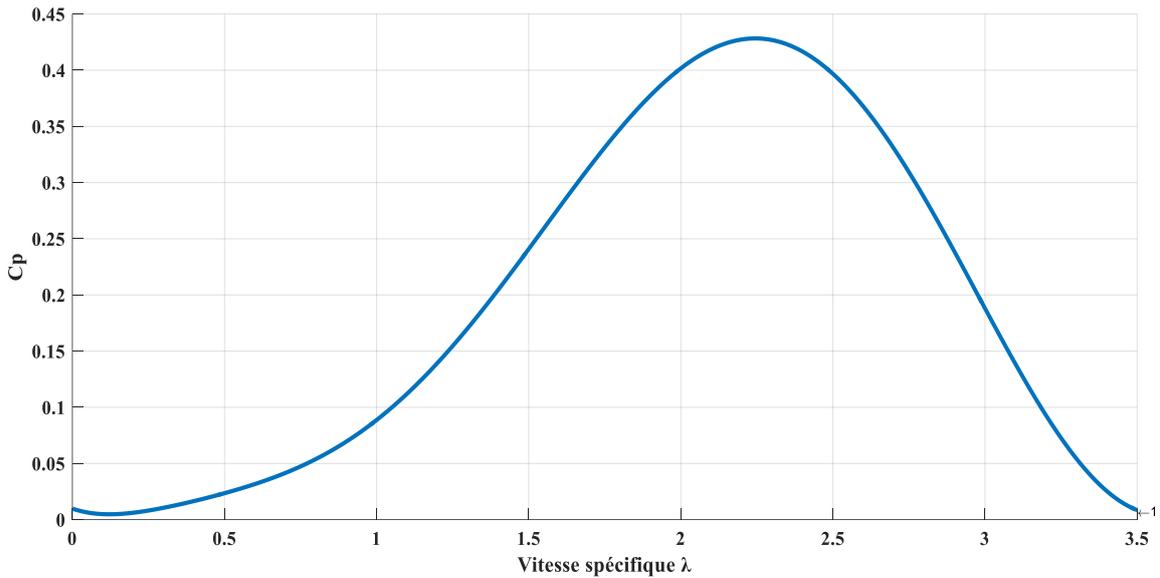


Figure III. 9 : Coefficient de puissance en fonction la vitesse spécifique.

III.4.3 Commande du convertisseur DC/DC boost

Fonction de transfert du correcteur PI :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III. 25})$$

Fonction de transfert de courant :

$$H(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{\alpha}(s)} = \frac{(C V_{dc})s + 2(1 - \alpha)I_L}{(LC)s^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \alpha)^2} \quad (\text{III. 26})$$

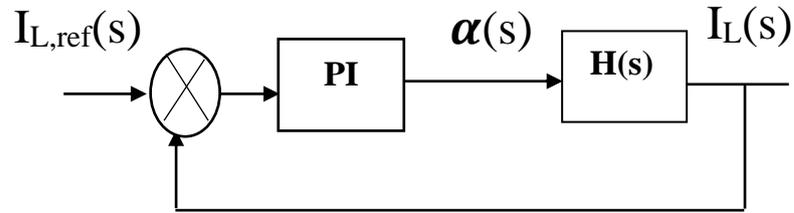


Figure III. 10 : La boucle de régulation de courant.

III.4.4 Commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel

Fonction de transfert du correcteur PI :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III. 27})$$

Fonction de transfert de la tension :

$$H_{v_{dc}}(s) = \frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{\alpha}(s)} = \frac{(1 - \alpha).V_{dc} - (LI_L)s}{(LC)s^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \alpha)^2} \quad (\text{III. 28})$$

Fonction de transfert de courant :

$$H_{i,bat}(s) = \frac{\hat{i}_{bat}(s)}{\hat{\alpha}(s)} = \frac{(C V_{dc})s + 2(1 - \alpha)I_{bat}}{(LC)s^2 + \frac{L}{R}s + (1 - \alpha)^2} \quad (\text{III. 29})$$

Fonction de transfert de la tension en fonction de courant :

$$H_{bat}(s) = \frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{i}_{bat}(s)} = \frac{(1 - \alpha) \cdot V_{dc} - (LI_L)s}{(CV_{dc})s + 2(1 - \alpha)I_{bat}} \quad (\text{III. 30})$$

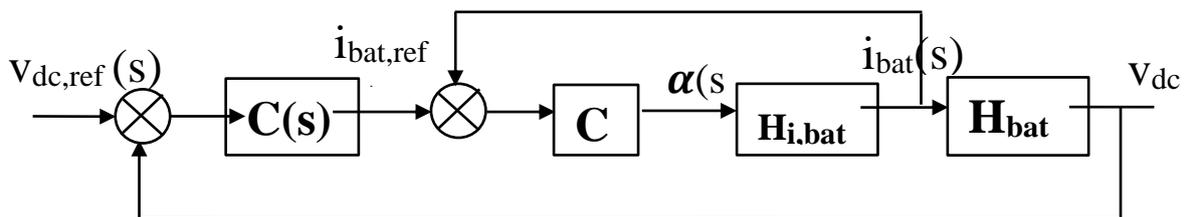


Figure III. 11: La boucle de régulation du système (tension/courant)

III.5 Résultats et discussion :

Le modèle du système éolien à vitesse variable basé sur la GSAP, illustré à la figure (III.10), est construit à l'aide de Matlab/Simulink. Le modèle de simulation développé est basé sur une éolienne de 10 kW. Le convertisseur de puissance et l'algorithme de contrôle sont également mis en œuvre et inclus dans le modèle. Le temps d'échantillonnage utilisé pour la simulation est de 18 s.

Les paramètres de la GSAP :

$R_s = 0.0485 \Omega$;

$L_d = 0.395 \times 10^{-3} \text{ H}$;

$L_q = 0.395 \times 10^{-3} \text{ H}$;

$p = 4$;

$\varphi_f = 0.18 \text{ Wb}$;

$P_n = 10 \text{ Kw}$;

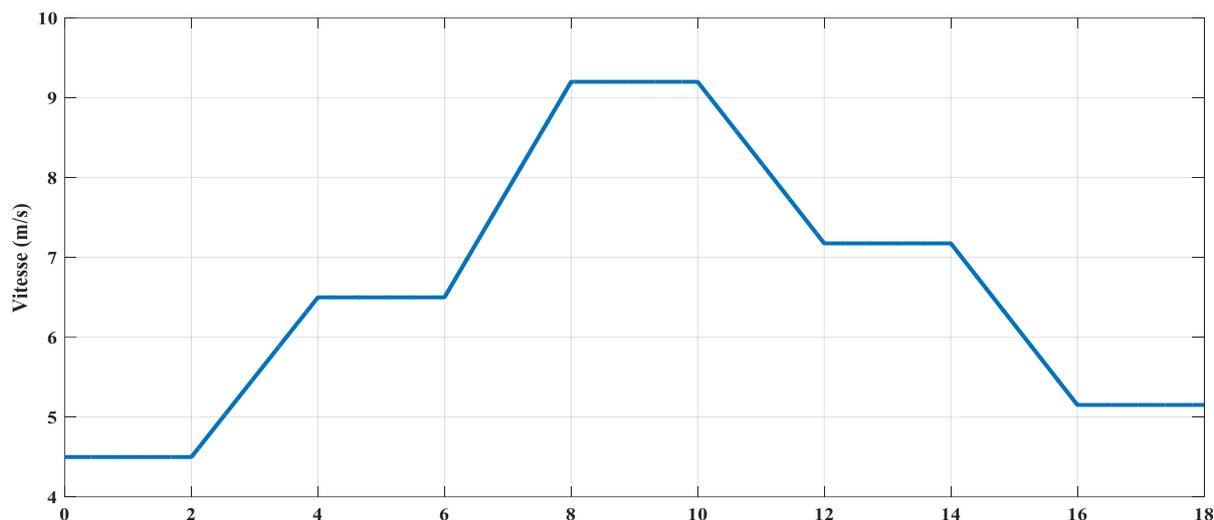


Figure III. 12 : Vitesse de vent.

Pour observer les performances de la stratégie de contrôle en fonction de la variation de la vitesse du vent, le profil du vent utilisé en entrée de la simulation, modélisé comme un processus stochastique, est présenté à la figure (III.12). Le profil du vent couvre une plage de vitesses entre 4,5 et 10 m/s, ce qui représente la plage entre la vitesse de démarrage de l'éolienne et la vitesse nominale (9,2 m/s).

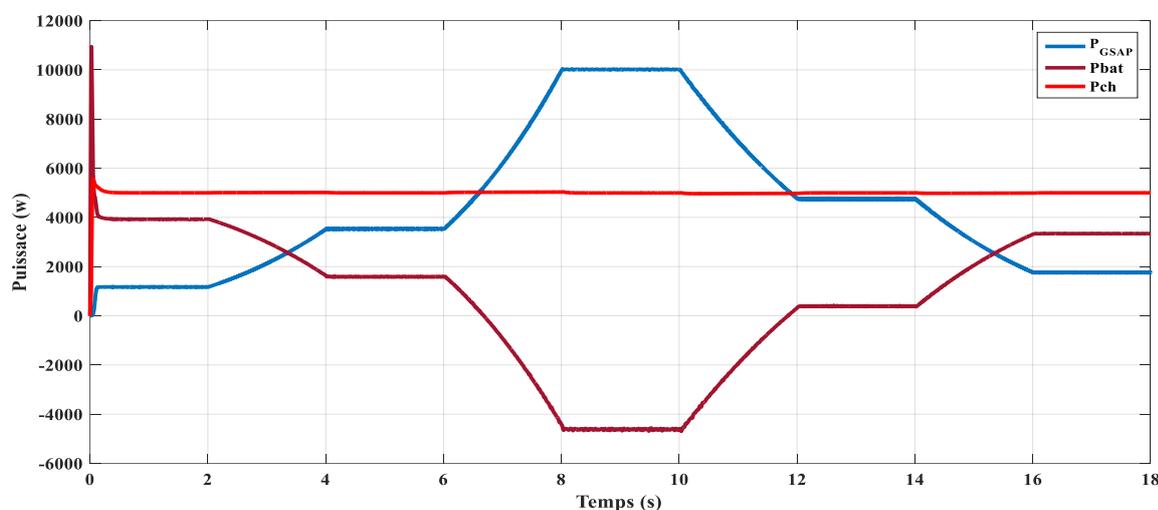


Figure III. 13 : Puissance de : GSAP, Batterie, Charge.

La puissance de la GSAP (P_{GSAP}), la puissance de la batterie (P_{bat}) et la puissance consommée par la charge (P_{ch}) sont présentées dans la figure (III.13). Pendant la période allant de 0 à 6,5 s et de 12 à 18 s, la puissance électrique produite par l'éolienne est insuffisante pour répondre à la demande, c'est pourquoi la batterie intervient pour combler le déficit énergétique. Par contre, pendant la période allant de 6.5 à 12 s l'éolienne produit une puissance suffisante qui assure les besoins énergétiques de la charge et de la batterie.

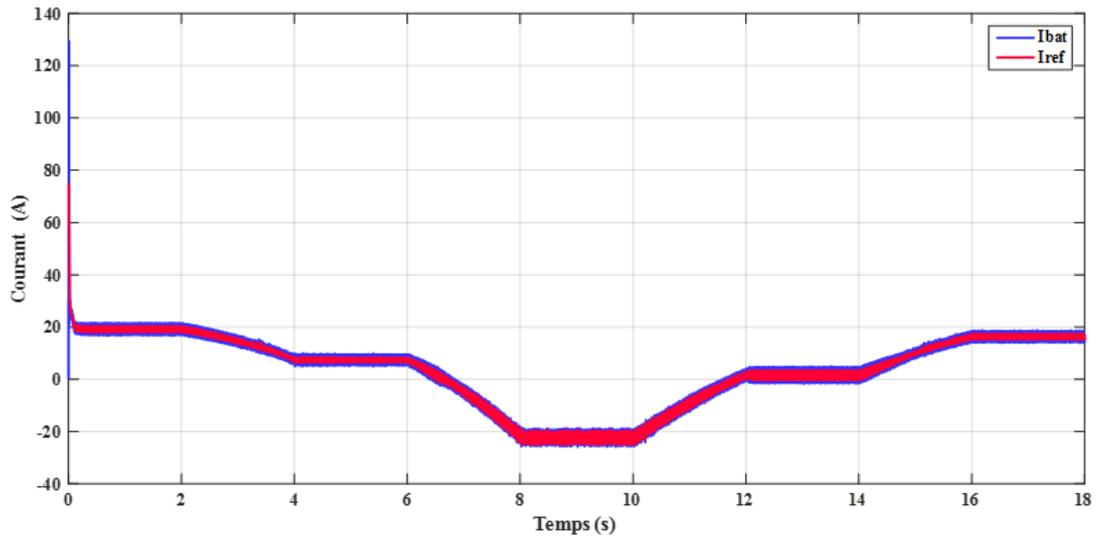


Figure III. 14 Courant de la batterie et sa référence.

La figure (III.14) montrant le sens du courant de la batterie et sa référence. Dans la période allant de 0 à 6.5 s et de 12 à 18 s le courant i_{bat} est positive (La batterie se décharge) et il diminue/augmente graduellement en fonction de la puissance générée par l'éolienne, Ce qui veut dire que si la puissance de l'éolienne augmente le courant délivré par la batterie diminue et vice-versa. A l'instant de 6.5 jusqu'à 12 s le courant i_{bat} est négative (La batterie se charge), on remarque aussi que le courant diminue et augmente graduellement en fonction de la puissance de l'éolienne.

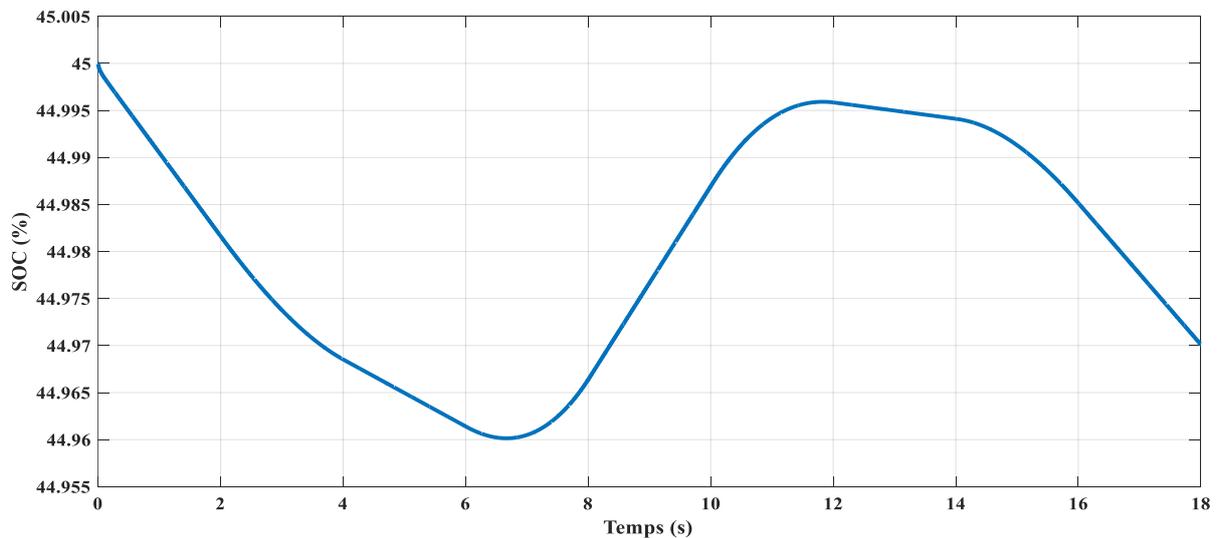


Figure III. 15 : Etat de charge de la batterie (SOC).

La figure (III.15) montre l'état de charge de la batterie en pourcentage. Entre 0 et 6.5 s, et entre 12 et 18 s, la batterie se décharge. La puissance de l'éolienne est insuffisante pour satisfaire seule le besoin énergétique de la charge.

Entre 6.5 et 12 s, la batterie se charge. La puissance de l'éolienne est suffisante pour satisfaire seule le besoin énergétique de la charge et de la batterie.

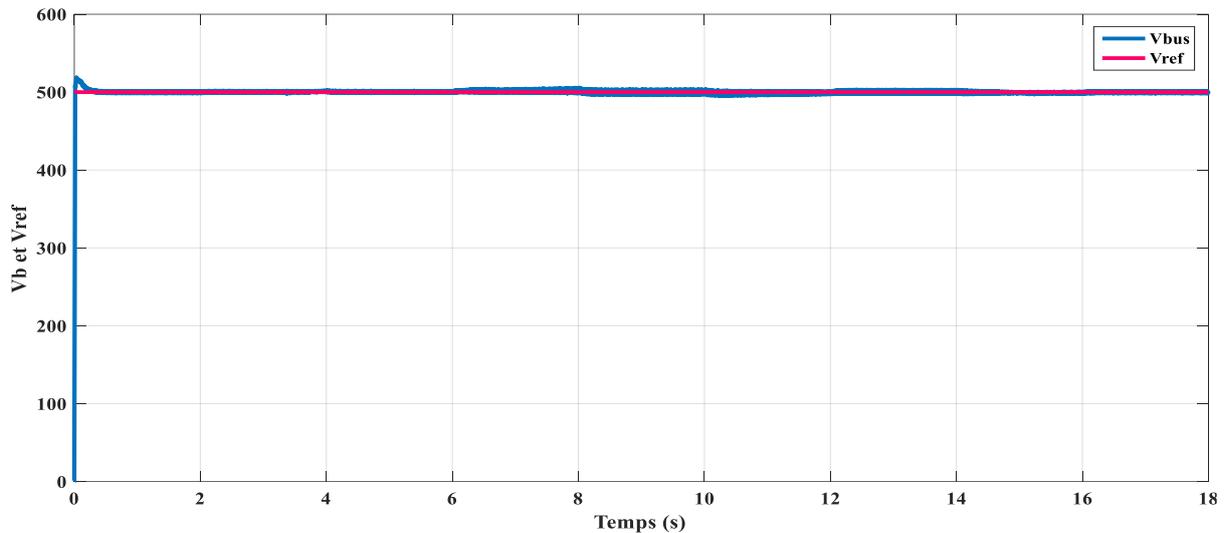


Figure III. 16 : : Tension de bus continue V_{dc} et de sa référence

La figure (III.16) montre la tension du bus continue V_{dc} . On remarque que la tension V_{dc} suit parfaitement sa référence. De plus, la vitesse du vent, autrement dit la vitesse de rotation du générateur n'influence pas sur la tension du bus continue V_{dc} qui reste proche de sa tension de référence 500V.

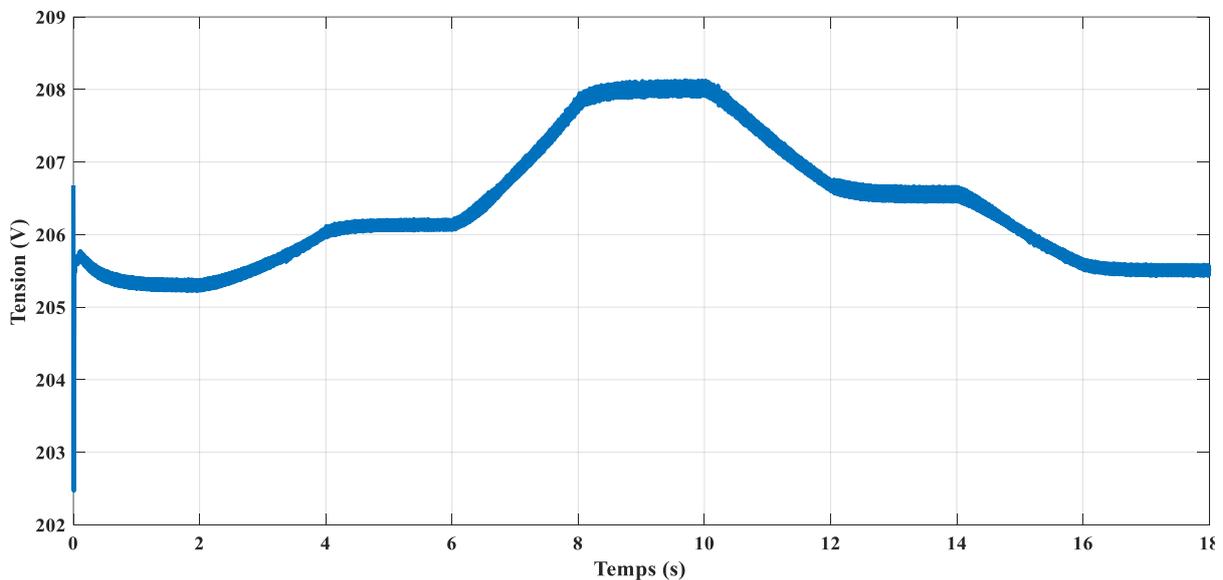


Figure III. 17 : Tension de la batterie.

La figure (III.17) présente la tension aux bornes de la batterie. On peut voir que la tension V_{bat} est stable à l'exception de quelques variations négligeables.

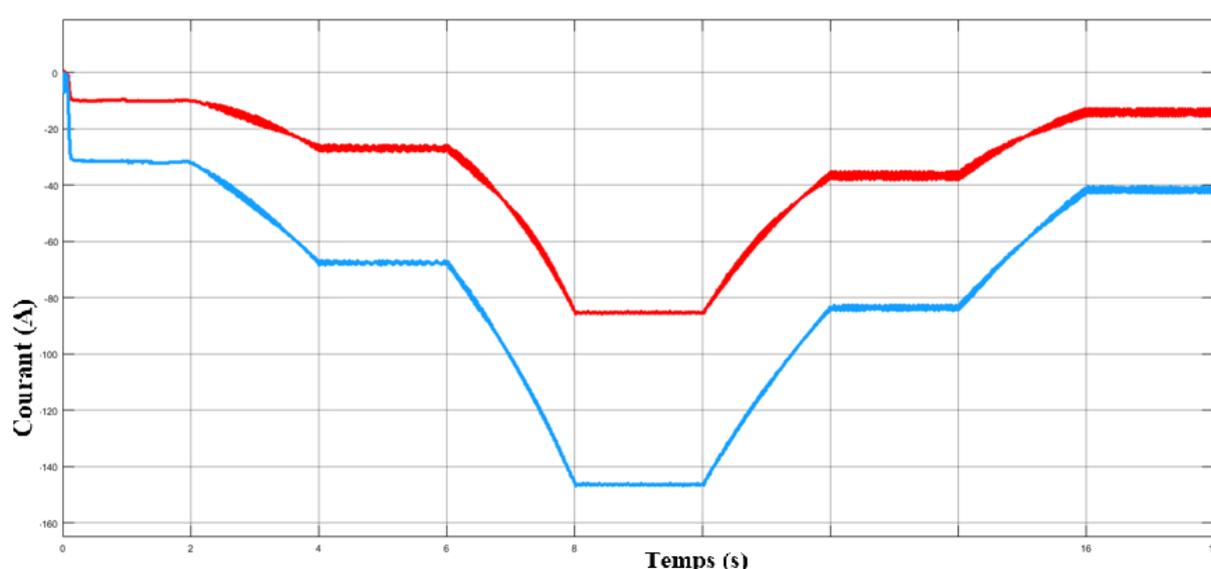


Figure III. 18 : Courants directe I_d et quadratique I_q de la GSAP

La figure (III.18) présente les courants directe et quadratique de la GSAP.

Les résultats de la simulation démontrent que le régulateur fonctionne très bien et présente de très bonnes performances dynamiques en régime permanent.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi un modèle global de la chaîne de conversion éolienne constituant principalement d'une génératrice synchrone à aimants permanents et une turbine éolienne. Le système présenté génère une puissance de 10 Kw. La commande du système a été aussi détaillée. Les résultats de la simulation réalisées ont été présentés et commentés. Les résultats de la simulation démontrent que le régulateur fonctionne très bien et présente de très bonnes performances dynamiques en régime permanent.

Conclusion générale

Ce mémoire sur les systèmes hybrides de production d'énergie basés sur l'éolien a exploré les aspects clés de cette technologie émergente. Les avantages significatifs en termes de stabilité, de fiabilité et d'autonomie énergétique.

Dans le premier chapitre on a dressé un rappel sur les différents types des énergies renouvelables suivi par l'état de l'art sur les systèmes hybrides de génération d'énergie électrique. Ensuite nous avons abordé les notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement et la classification des éoliennes ont été décrits.

Dans le second chapitre, nous avons abordé la description des machines électriques, essentiellement la machine synchrone à aimants permanents. On a présenté les types d'aimants permanents et les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que les différentes structures rencontrées.

Nous avons traité la problématique de la modélisation de cette machine en se basant sur le modèle de Park et les équations électromagnétiques et mécaniques régissant son comportement dynamique en tenant compte des hypothèses simplificatrices. La modélisation de la MSAP est essentielle pour comprendre et optimiser leur fonctionnement dans les systèmes de production d'énergie éolienne.

Dans le dernier chapitre on aborde la modélisation de la turbine éolienne et la simulation du système après avoir déduit les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine, les différentes zones de fonctionnement et les stratégies de contrôle utilisées ont été présentées. La zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée a été détaillée. Les algorithmes de maximisation de puissance ont été validés par des résultats de simulation.

Bibliographie

- [1]. **M. Lopez**, « Contribution A L'optimisation D'un Système De Conversion Eolien Pour Une unité de production isolée » Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.
- [2]. **O. Gergaud**, « Modélisation Energétique Et Optimisation Economique D'un Système De Production Eolien Et Photovoltaïque Couplé Au Réseau Et Associé A Un Accumulateur », Thèse De Doctorat, Ecole Normale Supérieure De Cachan, Décembre 2002.
- [3]. **Eurobserv'er**, « Seventh Inventory of Worldwide Electricity Production From Renewable Energy Sources », 2005.
- [4]. **A. Mirecki**, « Etude comparative de Chaînes de Conversion d'Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [5] **C. Darras**, « Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE », Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.
- [6]. **P.Barred** , « Energy Storage And Applications With Super Capacitors », Laboratoire Electrotechnique Industrielle Leisti-Ise, Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne Epflch 1015 Switzerland.
- [7]. **Vaughn Nelson**, «Wind Energy, Renewable Energy And The Environment », Crc Press 2009, Pp 45.
- [8]. **La grenelle de la mer**, « Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer », Année 2009.
- [9] **T. Zhou**, « Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [10]. **M. Kassa Idjdarene**, « contribution à l'étude et la commande du génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électrique éoliennes autonomes », thèse de doctorat de l'université Abderrahmane MIRA –Béjaia, université de Lille I, N°d'ordre 40283, 23 mai 2010,

- [11] **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, N° d'ordre 2213, 05 avril 2005.
- [12]. **A. Smadi, M. Farida**, « contribution à l'étude des systèmes éoliennes, application aux génératrices : A courant continue, Synchrones à pôle saillant et à aimant permanent », thèse ingénieur de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option maintenance, 27 juillet 2007.
- [13]. **S. Ameziane**, « Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien », thèse de magistère de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option maîtrise des énergies, 01 juillet 2009.
- [15] **T. Douadi**, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », thèse de magistère de l'université de EL Hadj Lkhdar –Batna, option maîtrise d'énergie,
- [16] **A. Boyette**, « Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [17] **J-C. Sabonnadière**, « Nouvelles technologies de l'énergie 1 », Lavoisier, 2006.
- [18] **BOUKAIS Boussad**, « contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCMPMSM) », Thèse de doctorat à université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, Février 2012
- [19] **R.Saou**, «Modélisation et optimisation de machines lentes à aimants permanents : Machines à double saillance et à inversion de flux», Thèse de doctorat d'état, ENP d'Alger, 2008
- [20] **A. Smadi, M. Farida** « contribution à l'étude des systèmes éoliennes, application aux génératrices : A courant continue, Synchrones à pôles saillants et à aimant permanent », thèse ingénieur de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option maintenance, 27 juillet 2007.
- [21] **Moussa siddo abdoulaziz** « étude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de L'énergie éolienne », mémoire ingénieur école nationale
- [22] **N. Kasbadji Marzouk** « Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie ? » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7.
- [23] **L. HAMANE** « les ressources éoliennes de l'Algérie » Bul. Ene. Ren, CDER, N°3, juin 2003. P 10-11
- [24] <http://www.sonelgaz.dz/?page=article&ida=364>

- [25] **P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi**, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [26] **Dr. Gary L. Johnson** « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001
- [27] **Guy Cuntz** « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », © Edisud, Aixen- Provence, 2001, www.edisud.com
- [28] **A. B. Raju, K. Chatterjee, B. G. Fernandes** « A Simple Maximum Power Point Tracker for Grid connected Variable Speed Wind Energy Conversion System with Reduced Switch Count Power Converters », 0-7803-7754-0/03/\$17.00 ©2003 IEEE
- [29] **A.M. El Refaie, T.M. Jahns, D.W. Novotny** « Analysis of Surface Permanent Magne Machines with Fractional Slot Concentrated Windings », IEEE Transactions on Energy Conversion 2006.
- [30] **A.Parviainen, A.Piispanen**, « Axial Flux Induction Electrical Machine», World Wilde Patent, Patent Number 3048723; 2008.*

Résumé :

Ce mémoire présente une étude approfondie d'un système hybride novateur pour la production d'énergie renouvelable. Dans le contexte actuel de la transition énergétique et de la nécessité de réduire notre dépendance aux énergies fossiles, l'utilisation de sources d'énergie renouvelable est essentielle. Cependant, la variabilité et l'intermittence de ces sources posent des défis pour assurer une production d'énergie constante et fiable.

En premier lieu en commence par une revue détaillée sur l'état de l'art des énergies renouvelable en s'intéressent davantage à l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement et la classification des éoliennes ont été décrits.

En second lieu nous avons approfondi nos recherches sur les déférentes machines utiliser comme l'aérogénérateur et pour cela le modèle de Park et les équations électromagnétiques et mécaniques suivies de leurs équitations d'état qui sont représentés sous forme de schéma bloc sur matlab/simulink afin d'évaluer les performances et les avantages d'une MSAP en mode génératrice dans un système éolienne + batterie.

Les résultats obtenus mettent en évidence le potentiel de ces systèmes pour répondre aux besoins énergétiques de manière durable, en réduisant notre empreinte carbone et en favorisant la transition vers une économie bas-carbone.

Summary:

This thesis presents an in-depth study of an innovative hybrid system to produce renewable energy. In the current context of energy transition and the need to reduce our dependence on fossil fuels, the use of renewable energy sources is essential. However, the variability and intermittency of these sources pose challenges to ensure consistent and reliable power generation.

Firstly, starting with a detailed review of the state of the art of renewable energies and focusing more on wind energy, different types of wind turbines and their mode of operation and the classification of wind turbines have been described.

Secondly, we will deepen our research on the machines used as wind generators and for this the Park model and the electromagnetic and mechanical equations followed by their state riding which are represented in the form of a block diagram on matlab / simulink to evaluate the performance and benefits of an MSAP in generator mode in a wind + battery system.

The results obtained highlight the potential of these systems to meet energy needs in a sustainable way, reducing our carbon footprint and promoting the transition to a low-carbon economy.