

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Batna

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique

Option : Maîtrise des Energies

Présenté Par :

BENAICHA Sabrina

(Ing., en Électrotechnique de l'Université de Batna)

Thème

Étude Théorique et Expérimentale d'une Génératrice Synchrone utilisée dans une Chaine Eolienne à Axe Verticale

Soutenu le : 25 Décembre 2014 Devant le Jury composé de :

Dr. B. AZOUI	Prof	Université de Batna	Président
Dr. S. DRID	Prof	Université de Batna	Rapporteur
Dr. A. MAKOUF	Prof	Université de Batna	Examineur
Dr. Dj. RAHEM	MCA	Université de Oum el-Bouaghi	Examineur
Dr. S. BENAGGOUNE	MCA	Université de Batna	Examineur

Remerciements

*Je remercie, en premier lieu, **ALLAH** qui m'a donné ce bien là pour que je vive ce jour, **ALLAH** qui m'a donné la force et la patience pour terminer ce travail.*

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et ma gratitude à mon encadreur, le Professeur S.DRID qui a proposé et dirigé ce travail.

Mes remerciements vont aussi à messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes professeurs tout le long de ces années d'études.

Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de L'électrotechnique pour les facilités qu'ils m'ont accordé pour parfaire ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicaces

A la mémoire de mon père,

A ma chère mère,

*A mes petits-enfants « Rania, Abderrahim et
Abderraouf »,*

A mes chers frères et sœurs,

A mon marié,

A toute ma famille,

A tous mes amis,

A vous

Je dédie ce mémoire.

Sabrina BENAICHA.

Introduction Générale.....	1
CHAPITRE I : Etat de l'Art des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne	
I.1. Introduction	4
I.2. Les énergies renouvelables	4
I.2.1. Situation actuelle des énergies renouvelables dans le monde.....	4
I.2.2. Les énergies renouvelables en Algérie	5
I.2.3. Programme des énergies renouvelables en Algérie	5
I.3. L'énergie éolienne	7
I.3.1. Contexte de la conversion d'énergie éolienne	7
I.3.2. Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne	8
a)-Les éoliennes onshore	8
b)-Les éoliennes offshore	8
I.3.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	9
a)-Les atouts de l'énergie éolienne	9
b)-Les problèmes qui se posent	10
I.3.4. Potentiel éolien en Algérie	10
I.3.5. Programme de l'énergie éolienne en Algérie.....	10
I.4. Etat de l'art, principes et éléments constitutifs de l'éolien	11
I.4.1. Principe	11
I.4.2. Constitutions d'une éolienne	11
I.4.3. Différents types d'éoliennes - caractéristiques C_p	12
a)- Axe horizontal (HAWT)	13
b)- Axe vertical (VAWT)	14
I.4.4. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	14
I.5. Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne	15
I.5.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone	15
I.5.2. Systèmes utilisant la machine synchrone	17
I.6. Machine synchrone à aimants permanents.....	19
I.6.1. Machines synchrones à flux axial.....	20
I.6.2. Machines synchrones à flux radial.....	21
I.7. Conclusion	22
CHAPITRE II : Modélisation de la chaîne éolienne	
II.1. Introduction	23
II.2. Conversion de l'énergie éolienne	23
II.2.1. Modélisation du vent	24
a)-Loi de Betz - notions théoriques	25
b)-Conversion en énergie mécanique	26

II.3. Modélisation de la turbine éolienne.....	27
II.3.1. Modélisation de la turbine à étudier.....	27
II.3.2 Simulation de la turbine.....	31
II.3.3 Mise en évidence du besoin de la partie négative de la courbe C_p	32
II.4. Le multiplicateur.....	33
II.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	34
II.5.1. Hypothèses simplificatrices.....	34
II.5.2. Représentation de la MSAP dans le système d'axe triphasés a, b, c.....	35
II.5.3. Représentation de la MSAP dans le système d'axe d, q.....	36
II.5.4. Mise sous forme d'équation d'état.....	39
II.5.5. Commande vectorielle de la MSAP.....	40
II.5.6. Commande vectorielle avec découplage de la régulation.....	41
des courants par compensation	
II.5.7. Résultats de simulation	42
II.6. Modélisation de l'association MSAP – Convertisseurs électroniques.....	45
II.6.1. Modèle mathématique du redresseur commandé.....	46
II.6.2. Modèle mathématique de l'onduleur.....	48
II.7. Commande de la chaîne éolienne.....	49
II.7.1. L'association MSAP – Redresseur commandé – charge.....	50
II.7.2. L'association MSAP – Redresseur commandé – Onduleur – Réseaux.....	53
II.7.3. Stratégie de commande découplée des puissances active et réactive.....	56
II.7.4. Résultats de simulation et interprétation.....	58
II.8. Conclusion.....	61
 CHAPITRE III : Architectures et méthodes de recherche du point maximum de puissance	
III .1. Introduction	62
III.2. Maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.....	62
III.2.1. Principe des techniques P&O « Perturb and Observe ».....	63
III.2.2. La technique Hill Climbing (H.C).....	65
III.2.3. MPPT par la logique floue.....	66
III.3. Maximisation de puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.....	73
III.3.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.....	73
III.4. Conclusion	76
 CHAPITRE IV : Elaboration du banc d'essai expérimental	
IV.1. Introduction.....	77
IV.2. Présentation du banc d'essais.....	77
IV.2.1. Partie « Puissance ».....	77
IV.2.2. Partie « Commande ».....	78

IV.2.3. Partie « Mesures »	79
IV.3. Emulateur éolien	81
IV.3.1. Modèle de la vitesse du vent ($V(m/s)$).....	81
IV.3.2. Modèle de la turbine.....	82
IV.4. Les convertisseurs utilisés.....	83
IV.4.1. Essai d'un hacheur parallèle(Boost).....	83
IV.4.2. Essai d'un hacheur série.....	84
IV.4.1. Essai d'un hacheur série-parallèle.....	84
IV.5. L'MPPT	85
IV.6. interprétation des résultats expérimentaux obtenus	88
IV.5. Conclusion	89
Conclusion générale.....	90
Annexes.....	92
Bibliographié.....	95

Abréviations & Symboles

MPPT	Maximum Power Point Tracking.
P_V	Puissance du vent.
P_{eol}	Puissance produit par la turbine.
C_p	Coefficient de puissance.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse mécanique de la turbine.
Ω_{mec}	Vitesse mécanique sur l'arbre de la génératrice
ρ	Masse volumique de l'aire.
Caer	Couple produit par l'aérogénérateur.
λ	Rapport de vitesse (vitesse relative de la turbine)
C_g	Couple mécanique sur l'arbre du générateur
C_{eol}	Couple produit par l'aérogénérateur.
G	Gain de multiplicateur.
R_s	Résistance d'une phase d'enroulement statoriques
L_d	L'inductance statorique sur l'axe d
L_q	L'inductance statorique sur l'axe q
K_t	Coefficient du couple
φ_f	Valeur crête du flux créé par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques
$\varphi_{d,q}$	Flux statoriques sur les axes d et q
$I_{d,q}$	Courant statorique sur les axes d et q
$V_{d,q}$	Tension statorique sur les axes d et q
C_e	Couple électromagnétique
$P(\theta)$	Transformation de Park
$P(\theta)^{-1}$	Transformation inverse de Park
S	Fonction définissant l'état d'un interrupteur du redresseur
V_{dc}	Tension redressée
i_{dc}	Courant redressé
i_{ch}	Courant de charge
$S_{d,q}$	Fonction d'état d'un interrupteur suivant les axes d et q
f_{ij}	Fonction définissant l'état d'un interrupteur de l'onduleur à MLI

*Introduction
générale*

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Sa consommation, au cours de ces dernières années, a considérablement augmenté. Le recours, des pays développés, aux centrales nucléaires procure l'avantage de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques (à vapeur ou à gaz), mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets ont rendu cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Ces énergies dites renouvelables et propres constituent une alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points:

- Elles respectent l'environnement (sont propres) ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques.
- Elles sont comme leurs noms l'indiquent « inépuisables ».
- Elles permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

Parmi ces énergies, on retrouve l'énergie dite éolien, véhiculée par le vent, celle-ci est due indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur est une machine qui utilise l'énergie cinétique du vent pour produire de l'énergie électrique. Aujourd'hui, après

l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre.

L'énergie éolienne est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante : + 28 % par an en moyenne depuis 10 ans (+ 20 % en 2011). [1]

L'Algérie aussi s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation.[2]

Ce mémoire est donc organisé en quatre parties de la façon suivante :

- Un état de l'art des énergies renouvelables est présenté dans le premier chapitre de ce document. Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production renouvelable mondiale. Dans ce cadre, la technologie éolienne est alors abordée et développée. Les méthodes de description du gisement éolien sont données, ce qui est un des facteurs du choix de la configuration de la chaîne éolienne. Quelques exemples, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, d'architectures de chaînes de conversion d'énergie sont donnés en association avec différents types de génératrices. Dans les limites de nos travaux, nous nous sommes intéressés à des systèmes éoliens de petite puissance dédiés à un site perturbé comme dans le milieu urbain. Les turbines à axe vertical, qui semblent être adaptées à ces conditions de fonctionnement fortement turbulentes, ont été considérées.
- Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation d'un système éolien adapté par une commande MPPT indirecte, et les différents types de commandes appliquées au convertisseur avec une étude théorique. On présentera aussi les différents schémas de simulations ainsi que les résultats réalisés avec le logiciel MATLAB/SIMULINK.
- Le troisième chapitre est consacré à une étude des stratégies de recherche du point maximal de puissance. L'association des éléments décrits dans le chapitre précédent permet d'avoir une vision globale de la chaîne de conversion d'énergie. La caractéristique de la voilure Savonius ici considérée est très fortement non linéaire avec une « forme de cloche » prononcée : elle nécessite impérativement d'adopter une stratégie de recherche du point maximal de puissance (Maximum Power Point Tracking). Les techniques développées, décrites dans cette section peuvent admettre que la caractéristique de la voilure est

inconnue : alors un dispositif MPPT basé sur la logique floue est une solution proposée. Dans le cas où cette caractéristique est connue, les stratégies de recherche de puissance optimale sont multiples (pilotage direct en couple ou en vitesse et commande indirecte par la commande du courant de charge).

- Le dernier chapitre, nous l'avons consacré à la présentation des résultats des expériences avec des interprétations et comparaison des courbes entre les résultats de simulation et expérimental.
- Enfin, nous concluons par une synthèse des travaux réalisés et des perspectives d'amélioration.

Chapitre I

*Energie éolienne :
Situation, Etat d'art*

I.1. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. Dans ce chapitre la situation de l'énergie éolienne dans le monde est décrite et spécialement dans notre pays, les principes de base de la conversion d'énergie, les différentes structures et l'état de l'art de l'énergie éolienne sont aussi détaillés.

I.2) – Les énergies renouvelables :

I.2.1) – Situation actuelle des énergies renouvelables dans le monde :

Parmi les énergies renouvelables nous citons :

L'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, la biomasse, la géothermie, l'hydraulique.

Ces énergies dites renouvelables et propres constituent une alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points :

- Elles respectent l'environnement (sont propres) ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques.
- Elles sont comme leurs noms l'indiquent « inépuisables ».
- Elles permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux.

La figure (1-1) présente la structure de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. En Europe, les ENR représentent 20% du mix électrique, avec 4 pays dépassant les 50% (Autriche : 66% - Suède : 55% - Lettonie: 55% – Portugal - : 53%) [3].

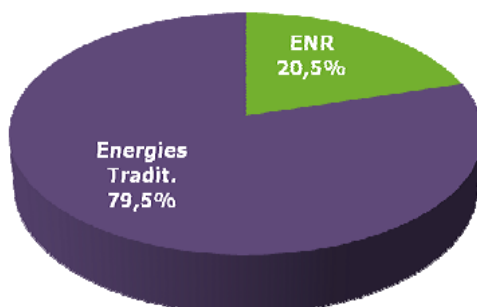


Figure I.1 :

De la Production électrique d'origine renouvelable dans le monde- 2011

I.2.2. Les énergies renouvelables en Algérie

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

Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

I.2.3. Programme des énergies renouvelables en Algérie

Aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, presque exclusivement, par les hydrocarbures, notamment le gaz naturel, énergie la plus disponible. Il n'est donc fait appel aux autres formes d'énergie que lorsque le gaz ne peut pas être utilisé.

A long terme, la reconduction du modèle national de consommation énergétique actuel peut rendre problématique l'équilibre offre-demande pour cette source d'énergie. A ces besoins s'ajoutent les volumes dédiés à l'exportation dont les revenus contribuent au financement de l'économie nationale.

De même, la production d'électricité devrait se situer entre 75 à 80 TWh en 2020 et entre 130 à 150 TWh en 2030. L'intégration massive du renouvelable dans le mix énergétique constitue en ce sens un enjeu majeur en vue de préserver les ressources fossiles, de diversifier les filières de production de l'électricité et de contribuer au développement durable.

Toutes ces considérations justifient la forte intégration, dès aujourd'hui, des énergies renouvelables dans la stratégie d'offre énergétique à long terme, tout en accordant un rôle important aux économies d'énergie et à l'efficacité énergétique [2].

Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en trois étapes :

- ◆ une première étape, entre 2011 et 2013, sera consacrée à la réalisation de projets pilotes pour tester les différentes technologies disponibles;
- ◆ la seconde étape, en 2014 et 2015, sera marquée par le début du déploiement du programme;
- ◆ la dernière étape, de 2016 à 2020, sera celle de déploiement à grande échelle.

Le programme inclut la réalisation, d'ici 2020, d'une soixantaine de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques, de fermes éoliennes et de centrales hybrides.

Ce programme est défini ainsi pour les différentes phases :

- ◆ Il est prévu l'installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW;
- ◆ à l'horizon 2016, une puissance totale de près de 650 MW serait installée;
- ◆ d'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2 600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2 000 MW;
- ◆ d'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12 000 MW

Pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10 000 MW. [2]

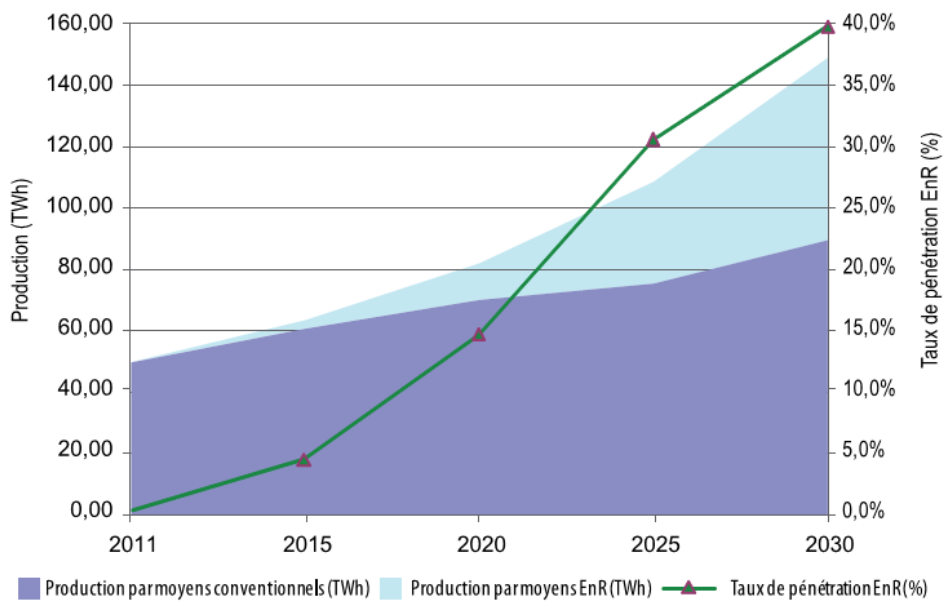


Figure I.2 : Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh

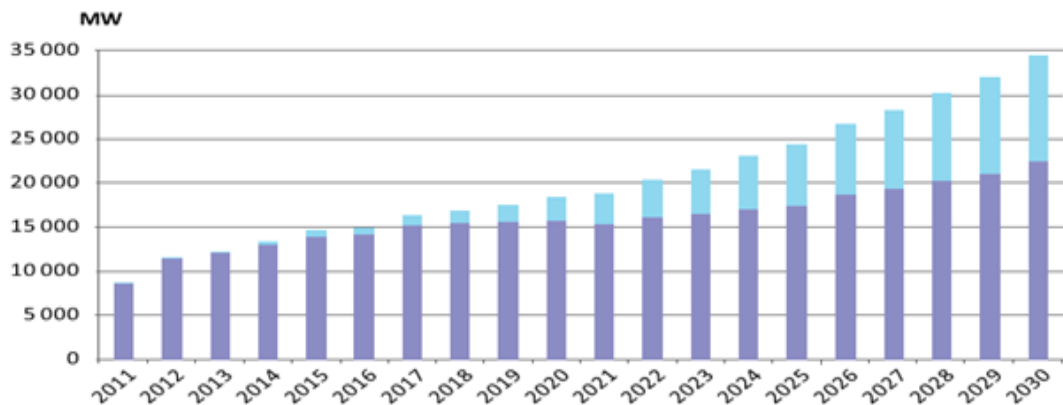


Figure I.3: Structure du parc de la production nationale en MW

I.3. L'énergie éolienne

Par définition, L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Eole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents. Elle est le fruit de l'action d'aérogénérateurs, de machines électriques mues par le vent et dont la fonction est de produire de l'électricité.

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté. L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor qui, couplé à une génératrice, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique figure (I.4).

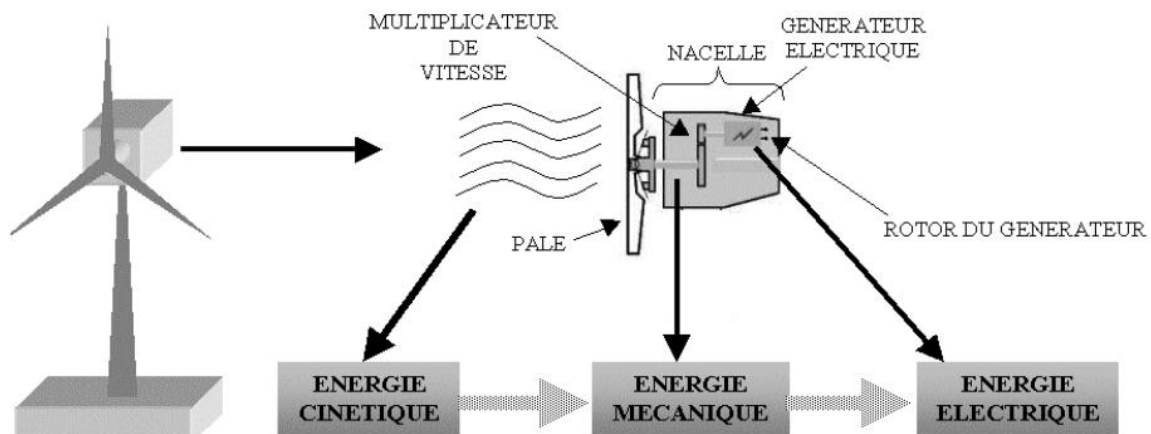


Figure I.4 : Principe de conversion de l'énergie éolienne

I.3.1. Contexte de la conversion d'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- **la transformation en énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- **la production d'énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par

exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité [4].

I.3.2. Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne

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

En pratique, une éolienne produit quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande et huit fois plus d'énergie si la vitesse du vent double. La densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est plus froid de 10°C. La puissance éolienne dépend principalement de l'intensité du vent et de ses variations. L'énergie éolienne est donc une énergie intermittente et aléatoire.

Le vent est plus fort et plus constant en mer. Les éoliennes installées sont également plus puissantes.

Donc parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est l'une des plus prometteuses,

A. Les éoliennes onshore

Une éolienne terrestre, ou onshore, est par définition installée sur la terre ferme. Les éoliennes terrestres sont utilisées depuis plusieurs décennies. Les retours d'expérience sont conséquents et les variables financières connues. Les éoliennes terrestres sont moins coûteuses à installer et plus faciles à entretenir que les éoliennes offshore, qui doivent répondre à des défis techniques plus importants liés aux conditions du milieu marin. Le rendement potentiel est toutefois moins important sur terre qu'au large, tant en qualité, du fait de la vitesse et de la constance réduite du vent, qu'en quantité, l'espace marin étant plus vaste.

B. Les éoliennes offshore

Historiquement, l'éolien en mer, ou offshore, a réellement démarré à la fin des années 2000. À cette époque, l'éolien à terre, ou onshore, commençait à atteindre dans des pays comme l'Allemagne et le Danemark, un certain niveau de saturation des sites d'installation. L'éolien offshore permet de profiter des ressources de vent en mer qui sont généralement plus importantes que sur terre : les vents sont plus forts et surtout plus réguliers, permettant un taux d'utilisation plus constant des installations, une meilleure prévision de la production et finalement, une production d'électricité plus grande.

L'éolien offshore possède d'autres atouts. Il s'affranchit, du moins en partie, des plus grands obstacles rencontrés à terre, comme la résistance des populations locales, généralement hostiles à l'installation des parcs éoliens près de leurs domiciles pour des raisons de bruit ou d'impact visuel. Installées loin des côtes, les turbines offshore sont moins confrontées à ce problème d'acceptabilité, mais doivent faire face à d'autres challenges comme la maintenance en mer et des coûts de raccordement au réseau plus élevés.

L'éolien offshore a démarré en premier en Europe, puisque la première ferme offshore a été construite en 1991 à Vindeby au Danemark, et que la plupart des 25 fermes en opération à la fin de l'année 2012 sont localisées en Europe. En effet, on comptait un peu plus de 4GW d'éolien offshore installés dans le monde à la fin de l'année 2011, dont 3,8GW en Europe, principalement au Danemark et au Royaume-Uni, ce dernier étant devenu ces dernières années la locomotive européenne (fig. 1-5). [5]

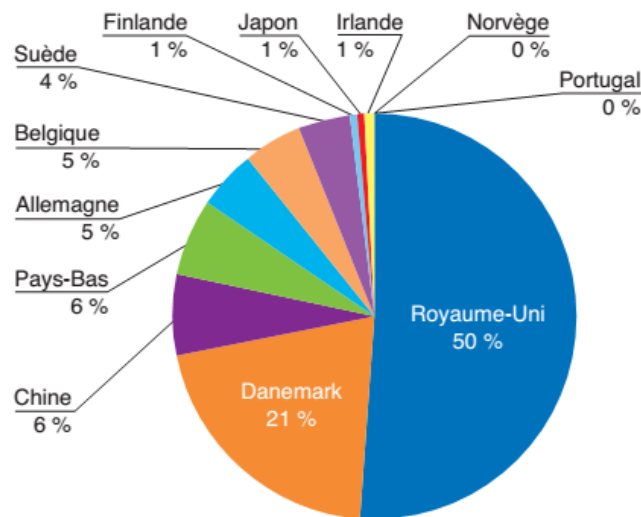


Figure I.5 : Répartition par pays des capacités éoliennes offshore installées dans le monde [5]

I.3.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

a)- Les atouts de l'énergie éolienne

- ✚ L'énergie éolienne est renouvelable et propre.
- ✚ En phase d'exploitation, cette énergie est presque totalement indépendante des ressources fossiles.
- ✚ Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole. L'installation peut être démantelée relativement facilement.

- ✚ Leur développement offshore présente un potentiel non négligeable.
- ✚ Implantées localement, les éoliennes peuvent permettre de répondre à des besoins électriques de masse tout comme à des besoins domestiques limités, selon la taille de l'éolienne.

b) -Les problèmes qui se posent

- L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent.
- C'est une source d'énergie intermittente.
- Les zones de développement sont limitées.
- Les éoliennes peuvent susciter des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores.
- Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin avec les autres usagers (exemple : pêcheurs, plaisanciers).

I.3.4. Potentiel éolien en Algérie :

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar.

L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s), selon la carte des vents, en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne figure (I.6).

I.3.5. Programme de l'énergie éolienne en Algérie :

Le programme EnR algérien prévoit dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées.

Des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW.

Sur la période 2014-2020, l'objectif est de parvenir à un taux d'intégration de 50%. Cette période sera marquée par les actions suivantes :

- construction d'une usine de fabrication de mâts et de rotors d'éoliennes;

- création d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle;
- montée en compétence de l'activité engineering et capacités de conception, procurement et réalisation capables d'atteindre un taux d'intégration d'au moins 50% par des entreprises algériennes. [2]

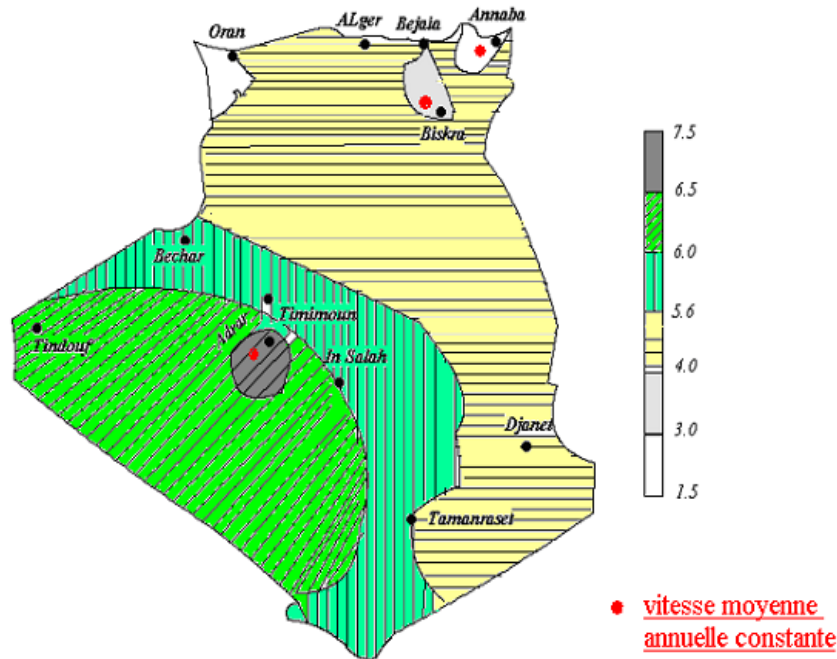


Figure I.6 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie [1].

I.4. Etat de l'art, principes et éléments constitutifs de l'éolien :

I.4.1. Principe :

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

I.4.2) - Constitutions d'une éolienne :

Une éolienne est constituée de plusieurs éléments tels représentés sur la figure suivante :

1: pales, 2: moyeu rotor, 3: nacelle, 4: cardan, 5: transmission, 6: multiplicateur de vitesse, 7: frein à disque, 8: accouplement, 9: génératrice, 10: radiateur de refroidissement, 11: centrale de mesures du vent, 12: contrôle, 13: centrale hydraulique, 14: mécanisme d'orientation face au vent, 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16: capot, 17: mât.

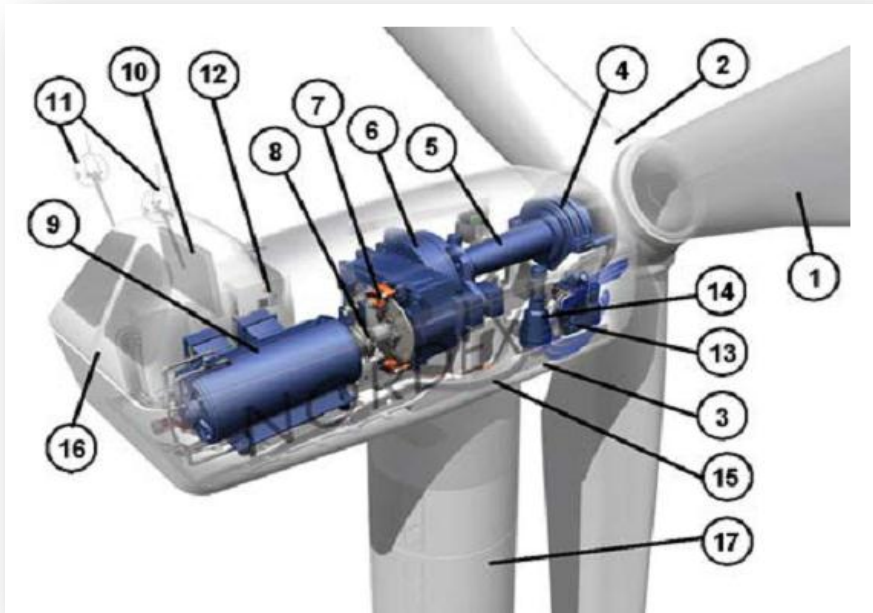


Figure I.7 :
Principaux éléments d'un aéro-générateur [3].

I.4.3)- Différents types d'éoliennes - caractéristiques C_p

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées.

Deux familles de voilures existent : les aéro-générateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT). Le graphique de la Figure (1-8) donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes :

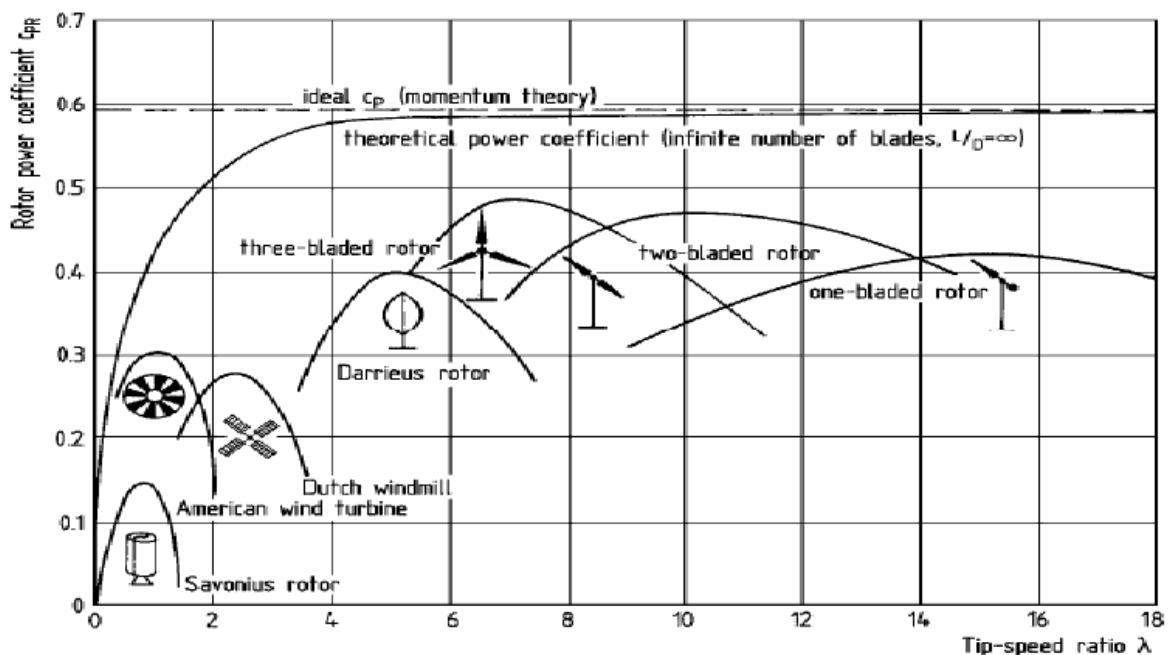


Figure I.8 : Coefficient de puissance des différentes configurations d'éoliennes [4].

a)- Axe horizontal (HAWT)

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales. La caractéristique de puissance $C_p(\lambda)$ dépend principalement du nombre de pales comme le montre la Figure (1-8) et des propriétés aérodynamiques de la voile (coefficient de poussée C_F , coefficient de couple C_M ...) [6].



Figure I. 9 : Eoliennes à axe horizontal [7]

La voile peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont à noter qui sont dues au passage des pales derrière le mat. La Figure (I.9) montre les deux procédés.

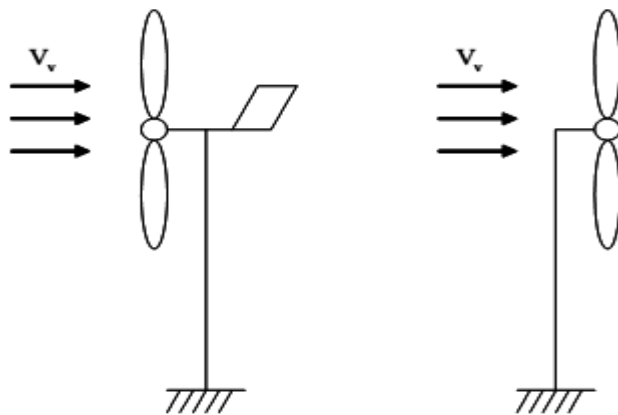


Figure I.10 : Type de montage de la voile a) upwind b) downwind [3].

b)- Axe vertical (VAWT)

Une autre famille d'éoliennes est basée sur les voilures à axe vertical. Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connu. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, comme montré à la Figure (1-10). Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales.

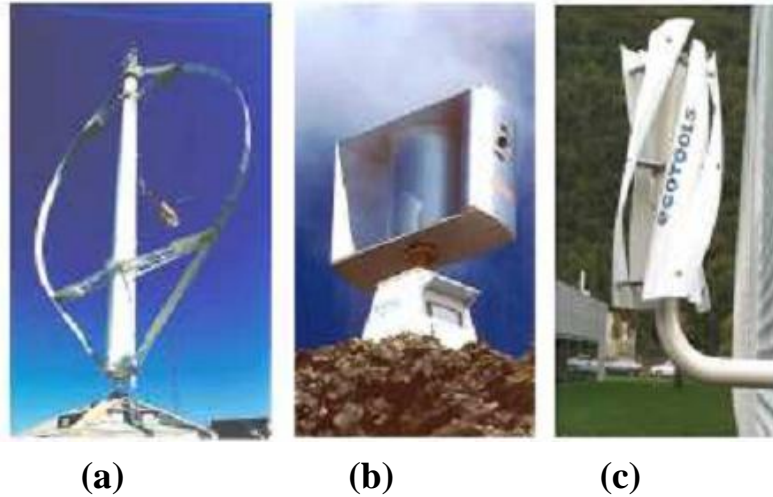


Figure I.11: Exemples des constructions VAWT (a) Darrieus, (b) Darrieus de type H, (c) Savonius [7]

I.4.4)- Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

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

A côté de la vitesse nominale V_n , on spécifie aussi [8] [9] [10]:

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

Les vitesses V_n, V_d, V_m définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent Figure (I.11) :

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V ;

- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n .

- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

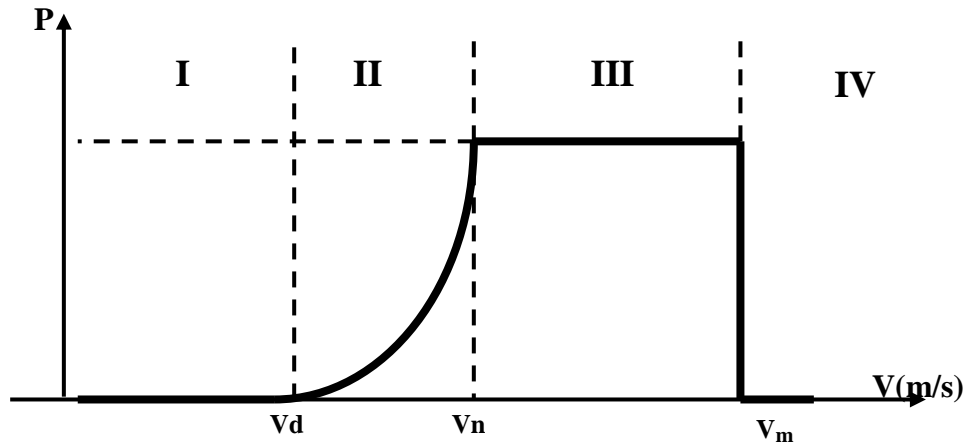


Figure I.11 : Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent

La plupart des éoliennes démarre lorsque la vitesse du vent atteint environ 3 m/s et s'arrête lorsque cette vitesse atteint 25 m/s. Généralement, les éoliennes sont paramétrées afin d'exploiter au mieux les vents de puissance intermédiaire [4].

I.5)- Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes :

au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. En fonction du type de générateur utilisé, il existe actuellement trois principaux types de systèmes éoliens :

- système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage (S.E.I.G.)
- système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation (D.F.I.G.ou MADA)
- système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants.

I.5.1)- Systèmes utilisant la machine asynchrone

La machine asynchrone équipe actuellement une grande partie du parc éolien. Elle a l'avantage d'être robuste et de faible coût.

Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écurueil au réseau figure (I.12). Un multiplicateur est associé à la machine et un banc de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau [8]. Cette structure est largement employée au Danemark depuis les années 70.

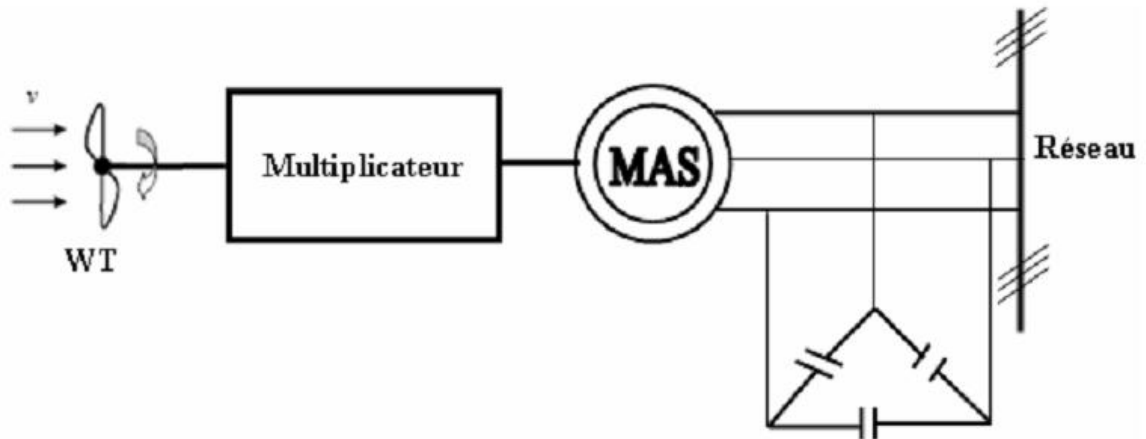


Figure I.12 : Machine asynchrone avec liaison direct au réseau

Le dispositif de la figure (I.13) permet de fonctionner à vitesse variable. Le redresseur à diodes fournit une tension continue variable en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne qui peut être exploitée par un onduleur MLI pour renvoyer sur le réseau une tension alternative à la fréquence adéquate et des courants sinusoïdaux.

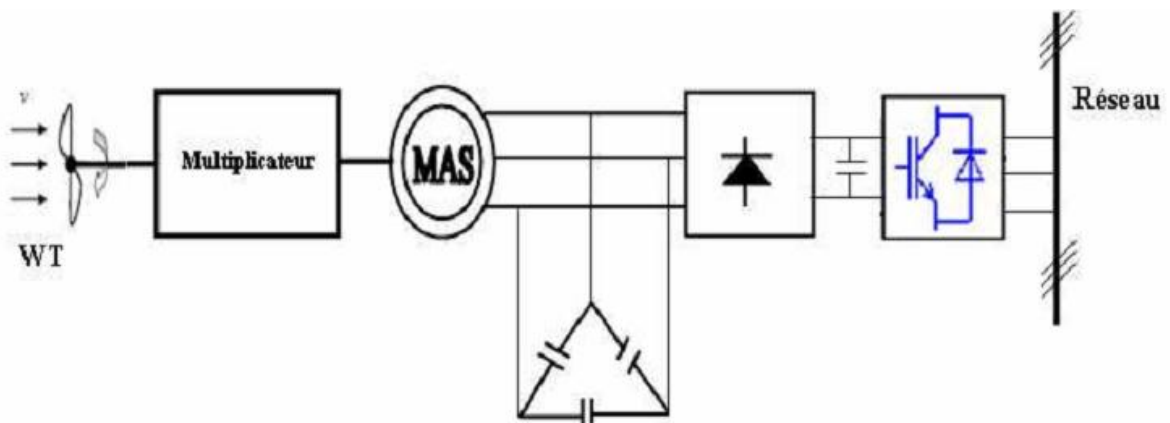


Figure I.13 : Machine asynchrone avec liaison indirecte au réseau

La magnétisation de la machine s'effectue avec un banc de condensateurs. Cette solution met en œuvre des convertisseurs de puissance qui doivent être dimensionnés pour la puissance totale envoyée par le générateur sur le réseau (coût et pertes importants) et des condensateurs pénalisants en termes de coût. Ces inconvénients ont freiné le développement industriel de cette structure.

La figure (I.14) montre une configuration avec la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). La MADA a la particularité de disposer de deux bobinages triphasés au stator et au rotor. L'un est relié directement au réseau et transfère la plus grande partie de la puissance alors que l'autre de moindre puissance permet de faire varier les courants rotoriques d'excitation de la MADA. C'est sur ce bobinage de moindre puissance que le convertisseur de puissance, composé d'un ensemble redresseur/onduleur MLI en cascade, est inséré afin de contrôler la vitesse de rotation de la machine.

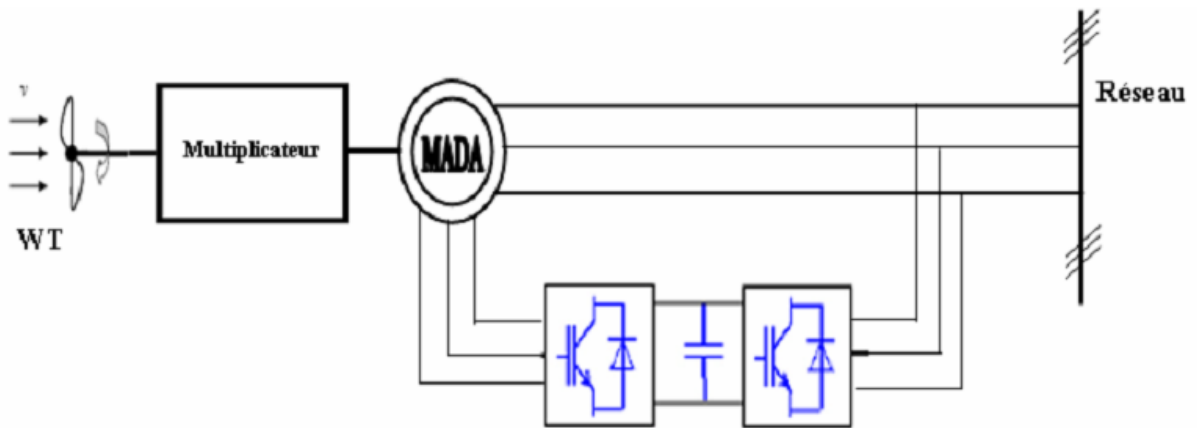


Figure I.14 : MADA avec 2 convertisseurs MLI en cascade reliés au réseau

Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Celui-ci a une puissance de l'ordre de 30 % de la puissance nominale fournie au réseau [8][10].

I.5.2)- Systèmes utilisant la machine synchrone

La Machine Synchrone (MS) a l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS. Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone. On notera que pour chaque topologie, il est possible de s'affranchir du multiplicateur de vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles.

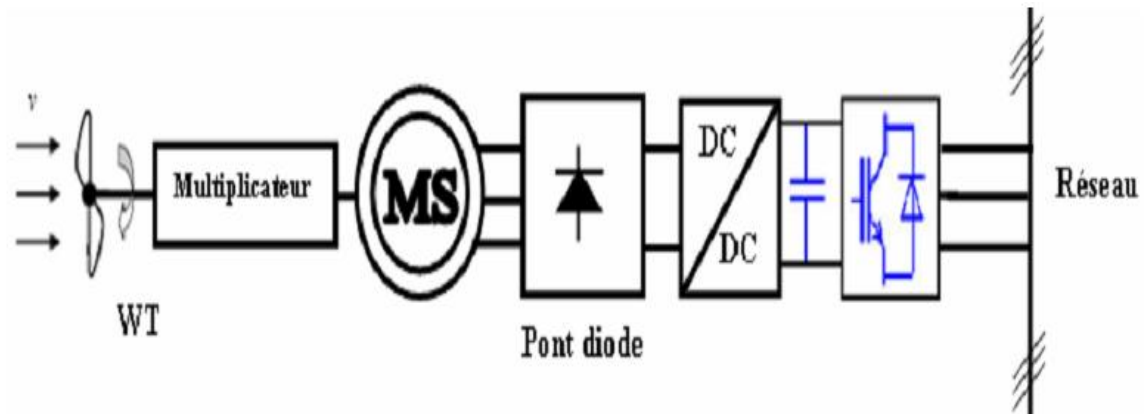


Figure I.15 : Machine synchrone reliée au réseau par un ensemble redresseur à diodes, convertisseur DC/DC et onduleur MLI.

Un redresseur à diodes, associé ou non à un convertisseur DC/DC, peut être utilisé figure (I.15). Cette solution est avantageuse sur le plan économique mais la qualité des courants de la génératrice est moins bonne qu'avec un redresseur MLI ; de plus le nombre de degrés de liberté sur l'ensemble de la chaîne de conversion est plus faible (trois contre quatre).

La machine synchrone peut être associée à un redresseur MLI qui permet de fonctionner à vitesse variable et donc de maximiser la puissance figure (I.16).

La topologie utilisant un redresseur à diodes et un boost comme convertisseur DC/DC est considérée comme la configuration optimale par Carlsson au regard du coût, de la qualité de l'énergie et du facteur de puissance [8][10].

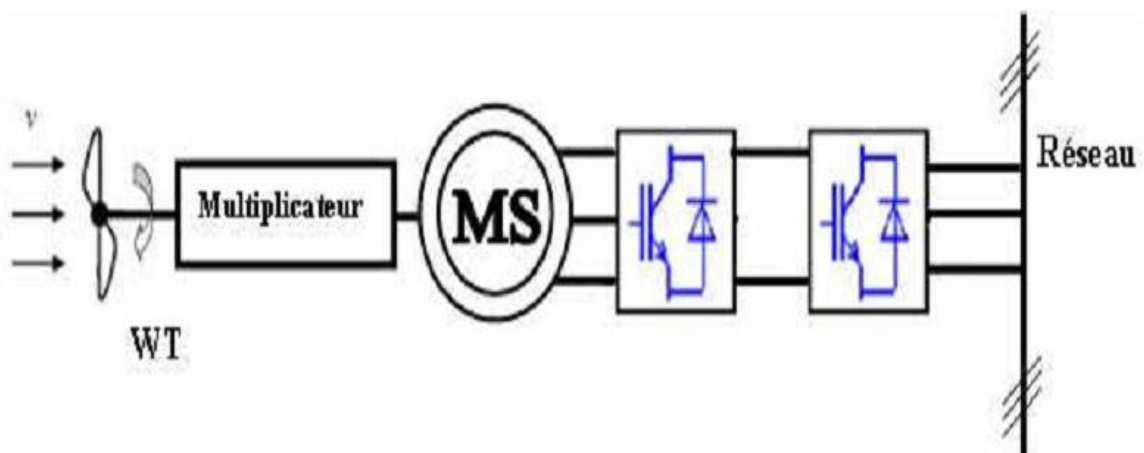


Figure I.16 : Machine synchrone au réseau par deux convertisseurs MLI en cascade

La structure de la figure (I.16) peut aussi être utilisée avec une MAS. Dans ce cas, le redresseur MLI assure la magnétisation de la machine asynchrone et le banc de condensateurs n'est plus nécessaire.

I.6. Machine synchrone à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation [9].

Les principales raisons pour choisir ce type de machine sont: rendement très élevé, grande puissance massique, simplicité du contrôle.

Dans la pratique, des génératrices synchrones à aimants permanents sont très peu utilisées. Il y a plusieurs raisons pour cela : d'abord, les aimants permanents tendent à se démagnétiser lorsqu'ils travaillent dans les champs magnétiques puissants à l'intérieur de la génératrice. En plus, les aimants forts (fabriqués de métaux rares tels que le néodyme) coûtent assez chers, malgré la baisse des prix qui a eu lieu dernièrement [9]. En effet, son rotor est plus léger, permet la régulation de la tension, et son bobinage est facilement modifiable [10]. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [10].

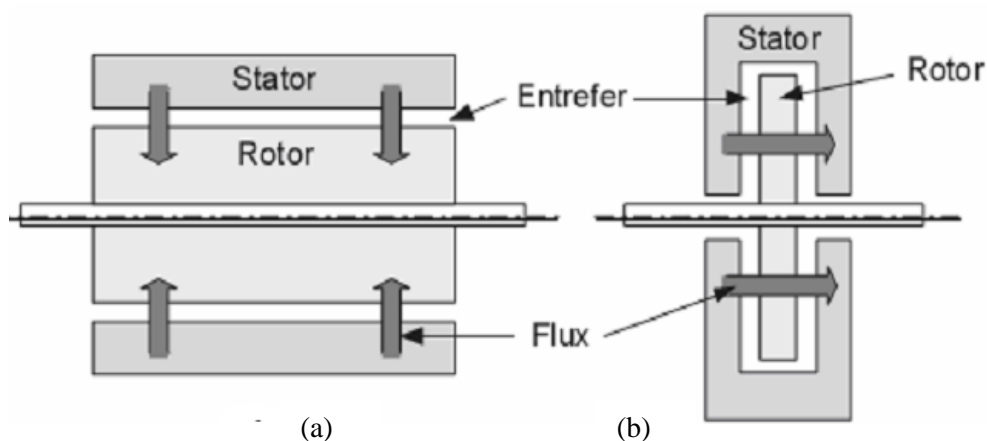


Figure I.17 : Machines à flux radial (a) et axial (b)

I.6.1. Machines synchrones à flux axial

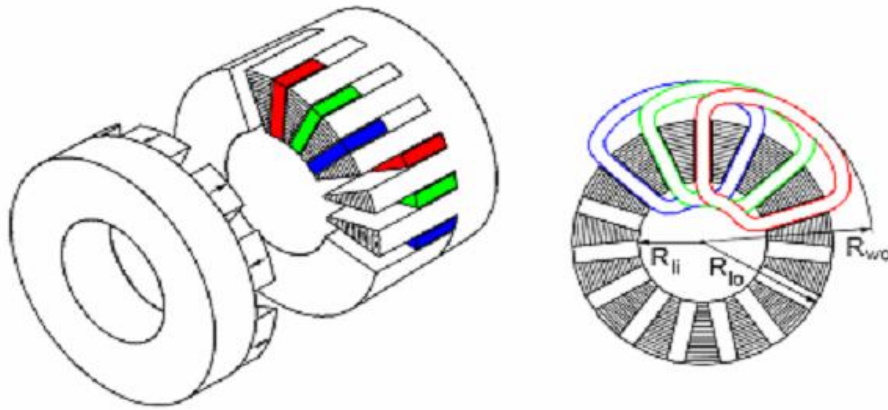


Figure I.18 : Machine synchrone à flux axial.

Pour une machine axialement courte, le volume d'entrefer et donc le couple produit sont plus importants pour une machine à flux axial que pour une machine à flux radial (équation (I.1)).

$$\begin{cases} \Gamma_{radial} \propto R_{ext} L_m \\ \Gamma_{radial} \propto \frac{R_{ext}^2 - R_{int}^2}{2} \end{cases} \quad (I.1)$$

Avec L_m la longueur de la machine, R_{ext} le rayon externe de la machine et R_{int} le rayon interne du rotor (machine axiale).

Pour les applications basses vitesses, la structure de la machine axiale reste compacte alors que la machine radiale tend vers une structure creuse [6]. Ceci conduit à un meilleur couple volumique pour la machine à flux axial.

La machine synchrone à aimants permanents et à entrefer axial dite "discoïde" peut être constituée, dans sa structure élémentaire (étage), soit d'un disque rotorique entouré par deux disques statoriques, soit de deux disques rotoriques entourant le disque statorique comme le montre la figure (I.19). Un disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique à section rectangulaire portant les bobinages statoriques. Ces derniers peuvent être enroulés autour du tore statorique, ou encore, ils peuvent être logés dans des encoches disposées radialement tout au long de l'entrefer. Cette structure axiale permet de réaliser une machine modulaire en disposant plusieurs étages les uns à côté des autres et en les connectant en parallèle [9].

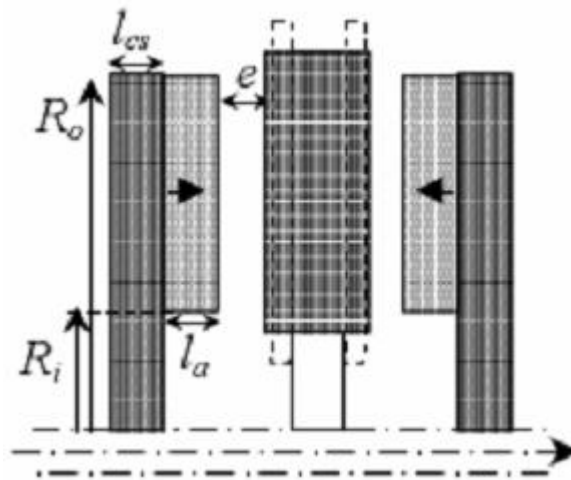


Figure I.19 : Etage d'une machine synchrone à aimants permanents discoïde

Un autre avantage de cette topologie est la possibilité d'assembler plusieurs machines sur un même axe afin d'accroître le couple. Un inconvénient de cette structure est que les forces d'attraction axiale entre le rotor et le stator peut contraindre à des renforcements mécaniques de la structure avec des conséquences sur le poids et le prix.

La machine discoïde utilise cette technologie et trouve des applications dans la propulsion navale. L'éolienne Jeumont J48 de 750 KW met en œuvre ce type de machine pour la vitesse variable à entraînement direct (grand nombre de pôles) [10].

I.6.2. Machines synchrones à flux radial

Plusieurs MSAP à flux radial ont été proposées dans la littérature. La plupart sont à rotor intérieur [10], [7] mais certaines ont un rotor extérieur [9]. Ce type de machine permet d'avoir de bonnes performances sur une grande plage de variation de la vitesse de rotation [8].

La figure (I.20) montre une MSAP classique à flux radial et à rotor intérieur.

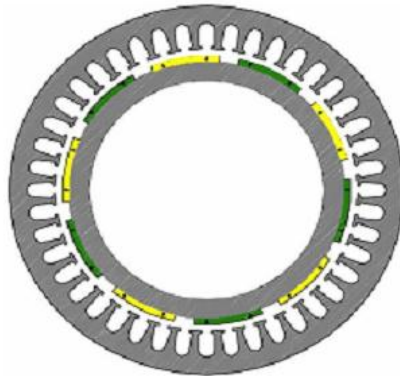


Figure I.20 : MSAP à flux radial

I.7. Conclusion

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, les génératrices utilisées, etc. Nos travaux portent sur un système éolien de petite puissance dédié à un site perturbé comme le milieu urbain. La turbine à axe vertical de type Savonius qui semble être particulièrement adaptée est alors étudiée. Nous avons également présenté une évaluation du potentiel éolien Algérien afin d'avoir une idée sur l'importance de l'investissement dans ce créneau.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne éolienne

II.1. Introduction

Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé le concept de chaîne éolienne complète. Nous établissons un modèle de simulation de l'ensemble de la chaîne éolienne en insistant notamment sur le caractère multi physique (prise en compte des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques) [11].

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance lie du système de commande [10]. Ce chapitre est composé de trois parties :

- Une première partie est consacrée à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillées,
- La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent, et on terminera cette partie par une simulation de ces configurations (MSAP et turbine) en fonctionnement générateur.
- Dans la troisième et dernière partie nous présenterons la modélisation du convertisseur associé.



Figure II.1: Structure du système de conversion éolien

II.2. Conversion de l'énergie éolienne

II.2.1. Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [7].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- développer et affiner la modélisation du rotor ;
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable ;

- fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par II.1 [10].

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

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

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

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

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

le modèle utilisé dans notre étude est donné par la relation :

$$V_v(t) = 7 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (\text{II.2})$$

L'allure du vent donné par la relation II.2 est représentée par la figure II.2.

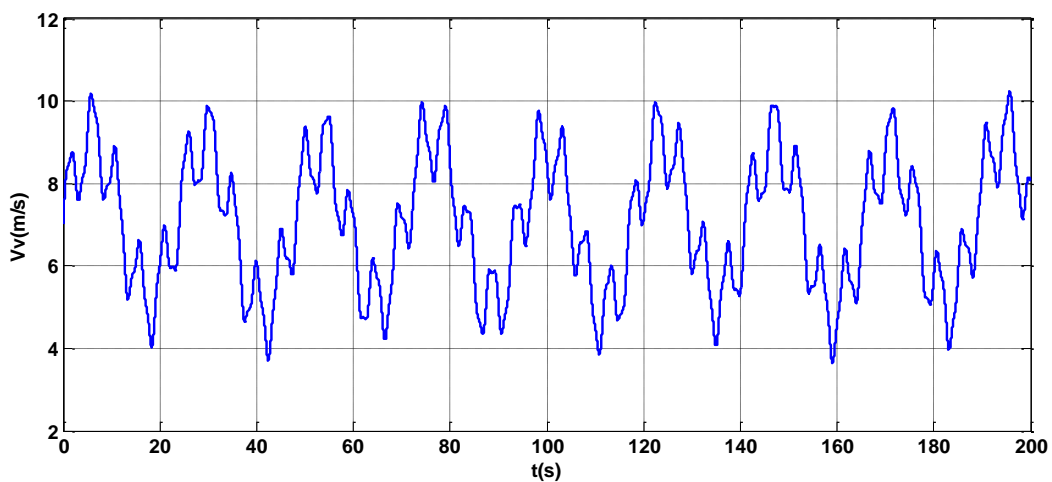


Figure II.2 : Allure du profil du vent utilisé reproduit sous MATLAB

a) Loi de Betz - notions théoriques

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.3) sur lequel on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur V_1 et V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor soit : $\frac{V_1 + V_2}{2}$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant une surface S des pales en une seconde est:

$$m = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II-3})$$

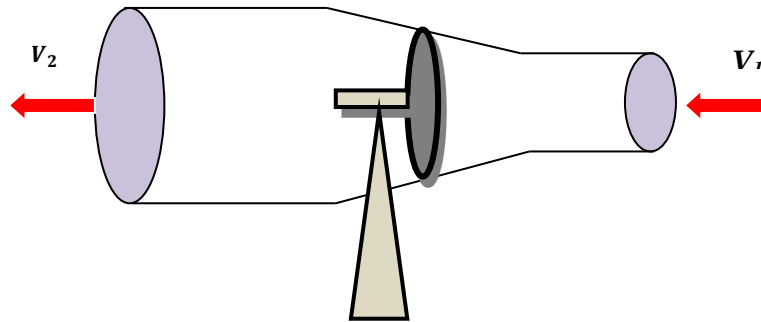


Figure II.3 : Tube de courant autour d'une éolienne

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton).

$$P_m = m \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \quad (\text{II-4})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II-4)

$$P_m = \rho S \frac{(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II-5})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors:

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

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors:

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_2^2}{V_1^2}\right)\right)}{2} \quad (\text{II-7})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus figure II.4, on s'aperçoit que le ratio P_m / P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_P présente un maximum de 16/27.

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la

vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

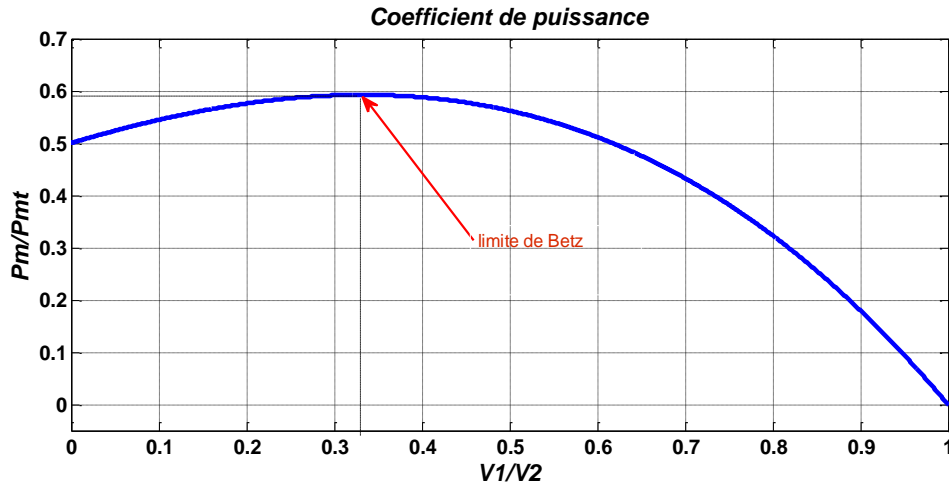


Figure II.4: Limite de Betz.

b) Conversion en énergie mécanique

En combinant les équations (II-1), (II-4) et (II-5), la puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur est s'exprime comme suit:

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_P(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_2} \quad (\text{II-9})$$

appelée vitesse spécifique ou (Tip-speed-ratio).

Avec $\Omega_1 R$ vitesse linéaire au bout des pales.

En tenant compte du rapport du multiplicateur G la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre après le multiplicateur est:

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_P \left(\frac{\Omega_2 R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II-10})$$

Avec Ω_2 : vitesse mécanique après multiplicateur.

II.3. Modélisation de la turbine éolienne

En tenant compte de ces considérations, le modèle mécanique de la figure (II.1) devient celui donné dans la figure (II.5) comportant deux masses tournantes grâce au couple aérodynamique[6] [11].

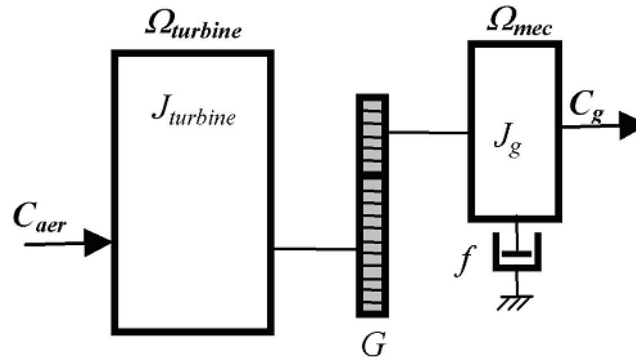


Figure II.5 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne

II.3.1. Modélisation de la turbine à étudier

La voilure éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Un modèle prenant en compte toutes ces propriétés n'est à l'heure actuelle pas envisageable. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique. Dans le paragraphe précédent (II.2.1), il a été démontré que la vitesse du vent peut s'écrire sous la forme d'une fonction scalaire (II-2) donc une seule variable vitesse du vent en fonction du temps $V_v(t)$ sera admise en entrée du modèle élaboré.

Une voilure éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique.

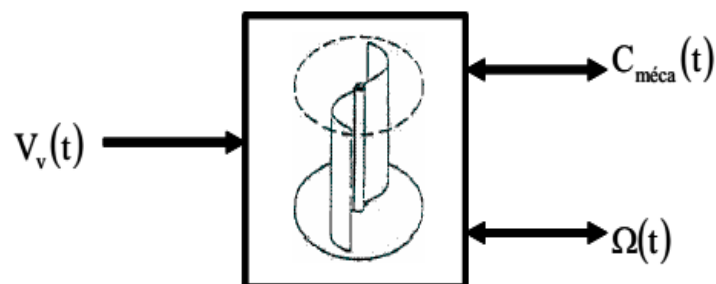


Figure II.6 : Entrées – sorties du modèle de la voilure

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant

par la section de la surface active S de la voile, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par [12]:

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (II.11)$$

Où:

ρ : représente la masse volumique de l'air (kg/m^3),

V_V : la vitesse du vent (m/s),

S : la Surface utile traversée par le vent a pour expression:

$$S = 2R \times H \quad (II.12)$$

R : représente le rayon de la voile (m)

H : représente la hauteur de la voile (m)

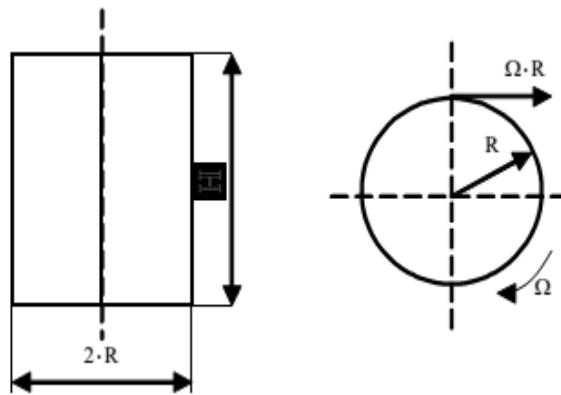


Figure II.7 : Dimensionnement géométrique de la voile Savonius

Le coefficient de puissance de l'éolienne de Savonius est exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. L'équation analytique de C_p en fonction de λ résultant de l'interpolation est:

$$C_p(\lambda) = -0.2121 \lambda^3 + 0.0856 \lambda^2 + 0.2539 \lambda \quad (II.13)$$

La figure (II.8) représente le tracé de la caractéristique $C_p(\lambda)$ où apparaît un maximum de 0.15 pour une vitesse réduite de 0,78. Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut donc essayer de conserver cette vitesse réduite, c'est-à-dire modifier la vitesse de rotation lorsque la vitesse du vent varie.

Selon la caractéristique propre de la voile $C_p(\lambda)$ de l'équation (II.13) la puissance éolienne est calculée :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (II.14)$$

A partir de cette puissance, le couple éolien est donc donné par:

$$C_{eol} = P_{eol} / \Omega \quad (II.15)$$

En remplaçant la valeur de la puissance par le produit (couple × vitesse) et en utilisant:

$$C_{eol} = \frac{C_p(\lambda) \times \rho \times R^2 \times H \times V_V^2}{\lambda} \quad (II.16)$$

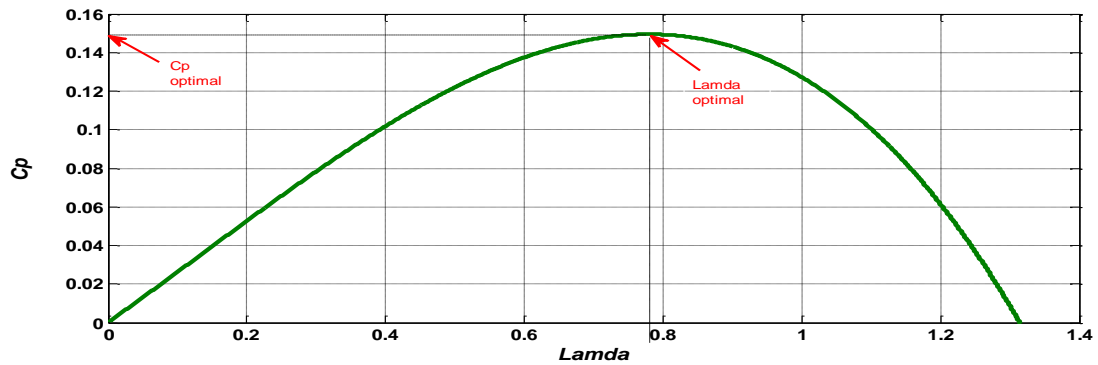


Figure II.8: Courbe $C_p(\lambda)$ de la voile étudiée de type Savonius

Les figures II.9 représente un réseau de caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation, le paramètre étant la vitesse du vent.

Afin d'obtenir la vitesse de rotation de la turbine, on utilise l'équation mécanique de l'arbre de la turbine solidairement lié à celui de la machine synchrone utilisée. [13][14]

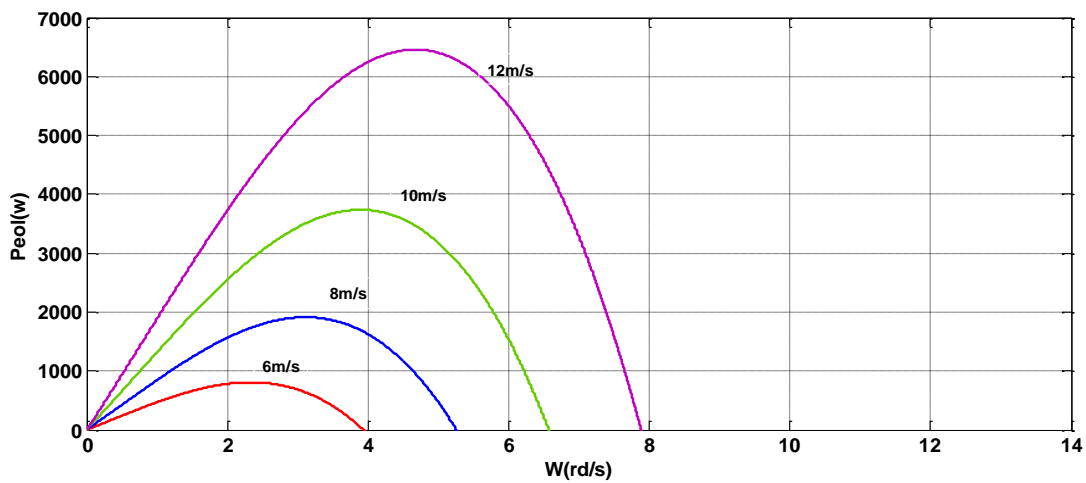


Figure (II.9): Caractéristiques $P_{eol}(\Omega)$

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{éol} - C_{méc} - (f_t + f_m) \cdot \Omega_{méc} \quad (II.14)$$

Avec :

- J_m : inertie de la machine.
- f_m : coefficient de frottement de la machine.
- J_t : inertie de la turbine.
- f_t : frottement des pâles.
- $C_{éol}$: le couple statique fournie par l'éolienne.
- $C_{méc}$: Couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine.

Nous disposons uniquement des paramètres mécaniques de la machine et de l'inertie de la voilure. C'est pour cela que dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure n'est pas pris en compte).

$$\begin{aligned} J &= J_t + J_m \approx J_t \\ f &= f_t + f_m \approx f_m \end{aligned} \quad (II.15)$$

Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante : [13][14]

$$C_{éol} = J_t \frac{d\Omega}{dt} + C_{méc} + f_m \Omega \quad (II.16)$$

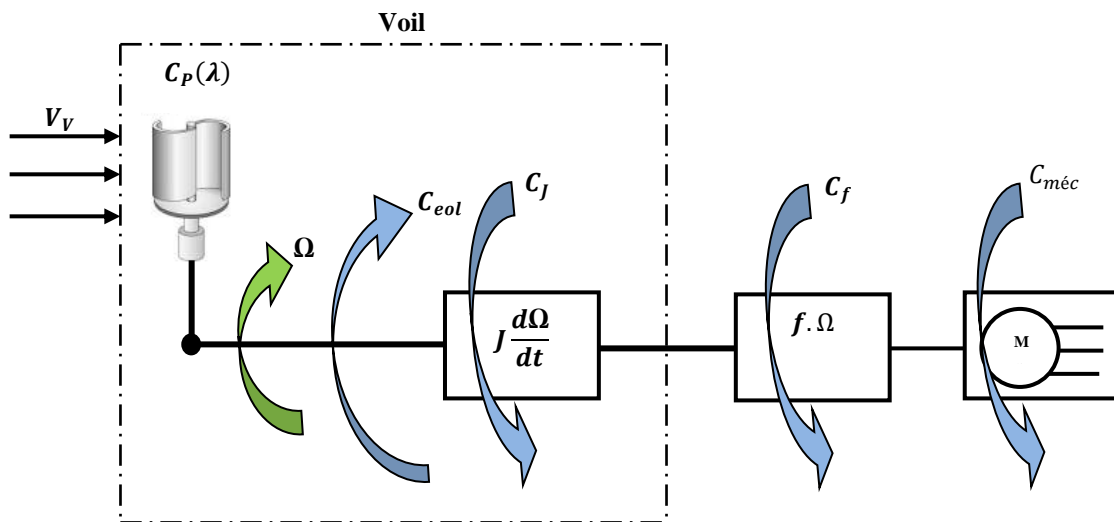


Figure II.11 : Schéma bloc d'une turbine éolienne

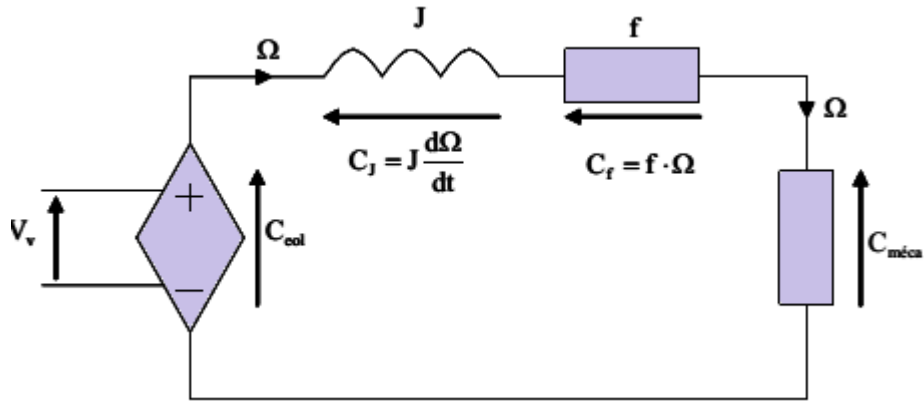


Figure II.12 : Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne[13]

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$\Delta C = C_{eol} - C_{méc} = J \left(\frac{d\Omega}{dt} \right) + f \cdot \Omega \quad (II.17)$$

D'où, après le réarrangement des termes, la valeur de la vitesse obtenue par :

$$\Omega = \frac{1}{J} \int (\Delta C - C_f) dt \quad (II.18)$$

$$\text{Où : } C_f = f \cdot \Omega$$

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne de type Savonius basé sur cette équation est donné par la Figure (II.13) :

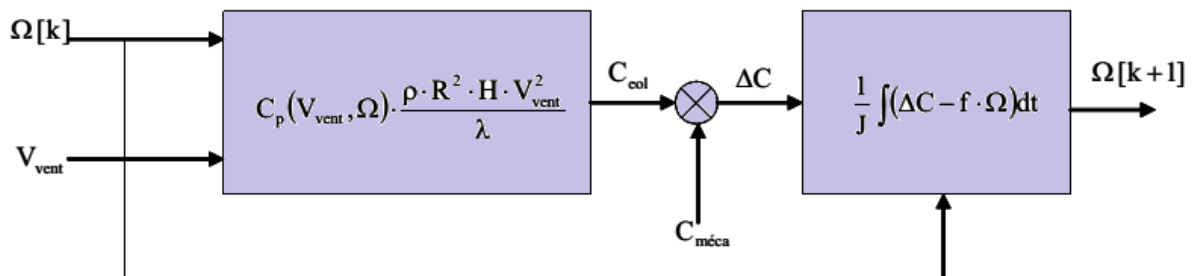


Figure II.13 : Schéma de modèle dynamique de la turbine Savonius [6]

II.3.2 Simulation de la turbine

Les Figures (II.14-a) et (II.14-b) présentent la vitesse de vent et Couple mécanique développée par la turbine, les Figures (II.14-c) et (II.14-d) présentent la puissance et le couple à la sortie de la turbine à vide et pour une vitesse moyenne du vent égale à 7m/s.

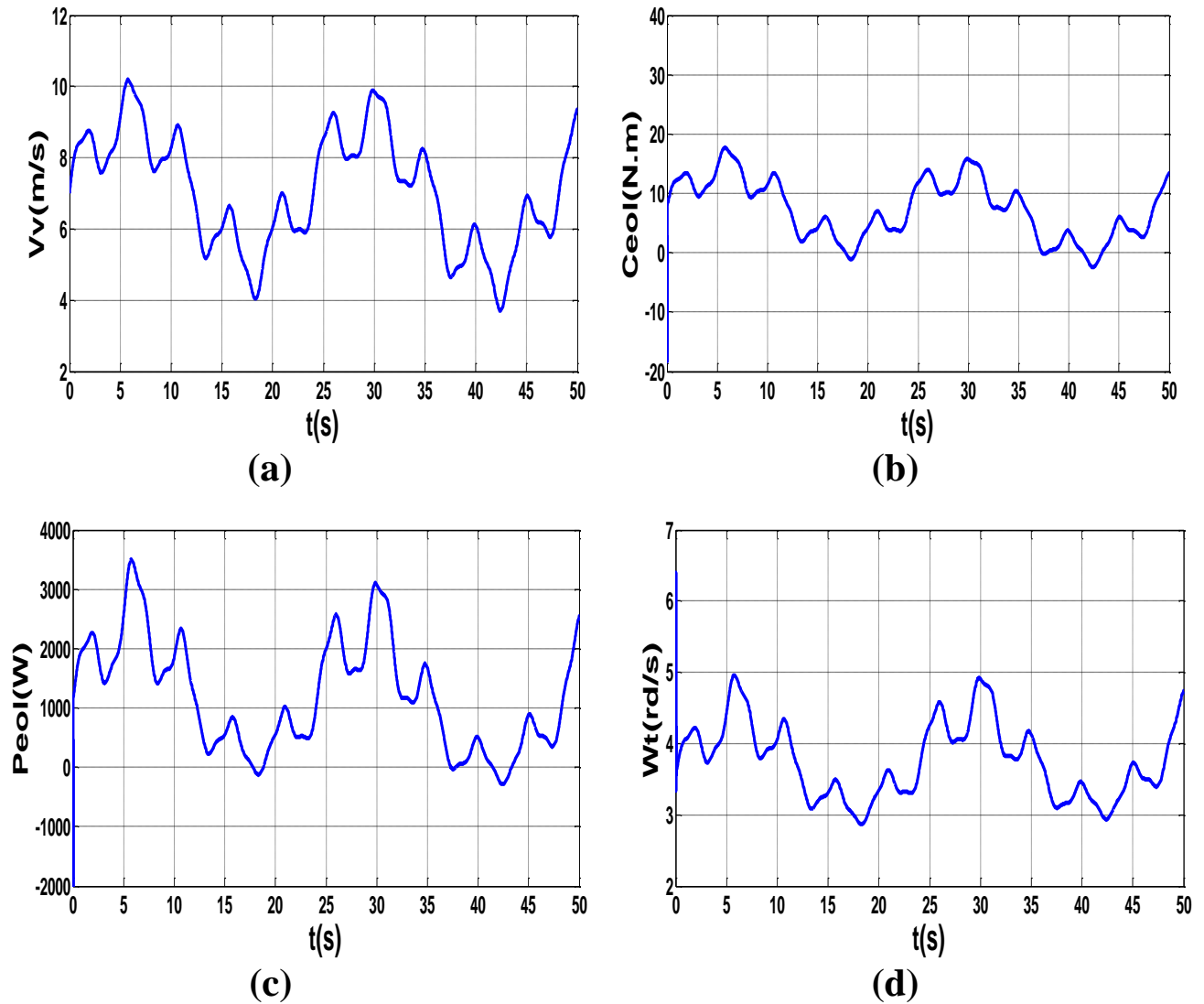


Figure II.14 : a : Vitesse de vent, b : Couple mécanique développée, c : Puissance mécanique produite par la turbine, d : Vitesse mécanique de la turbine.

II.3.3 Mise en évidence du besoin de la partie négative de la courbe C_p

Habituellement, la caractéristique d'une voilure éolienne $C_p(\lambda)$ est donnée strictement dans la portion usuelle comme sur la Figure (I.8), c'est-à-dire pour les valeurs de coefficient de puissance positif. Il est vrai que c'est cette partie de la courbe qui est la plus intéressante du point de vue énergétique. [6]

Les transferts de la puissance pendant un fonctionnement « normal » de la turbine éolienne sont donnés par la Figure (II.12.a) (où P_j et P_f représentent la puissance de l'inertie J et des frottements f). Dans ce cas, on a :

$$\lambda \leq \lambda_0, C_{eol} > 0, \Omega > 0 \text{ et } P_{eol} = C_{eol} \cdot \Omega > 0 \quad (\text{II.19})$$

Donc selon l'expression (II.13) le coefficient de puissance est positif :

$$C_p > 0 \quad (\text{II.20})$$

Remarque : Le flux de l'énergie de l'inertie J est bidirectionnel selon l'accélération ou décélération de la turbine.

Mais pour que le modèle de la turbine prenne en compte toutes les plages de son fonctionnement dynamique, il faut élargir la représentation de sa courbe caractéristique pour des valeurs de coefficient de puissance C_p : i.e. pour des vitesses réduites supérieures à la valeur λ_0 (λ_0 : valeur de la vitesse réduite pour $C_p=0$).

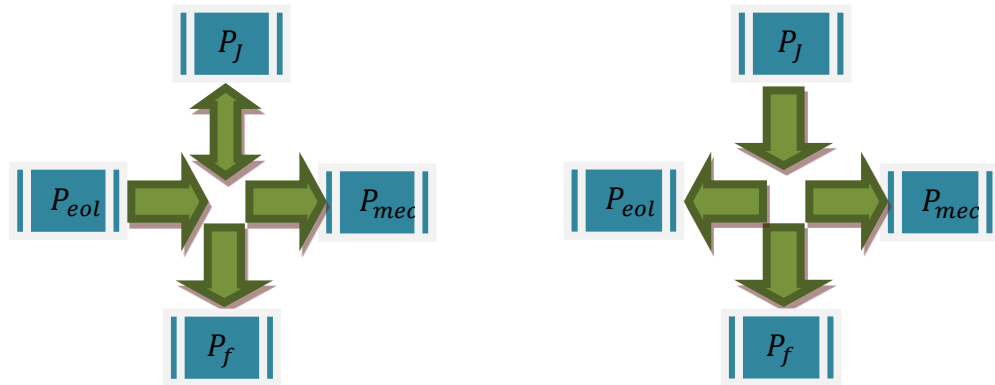


Figure II.15 : Transferts de la puissance dans la turbine éolienne a) fonctionnement « normal »
b) fonctionnement « ventilateur »[6]

Dans le cas où la vitesse du vent Vv diminue brusquement, la vitesse réduite définie par l'expression (II.9) peut prendre des valeurs supérieures à λ_0 à cause de l'inertie J de la turbine. L'éolienne se comporte comme un « ventilateur » et elle consomme de la puissance stockée dans la masse en rotation. Le couple de l'éolienne dont les pales sont freinées par l'air change de signe ainsi que le sens de transfert de puissance. Les transferts des puissances dans un fonctionnement type « ventilateur » sont donnés sur la Figure (II.12.b). Dans ce cas on a :

$$\lambda > \lambda_0, C_{eol} < 0, \Omega > 0 \text{ et } P_{eol} = C_{eol} \cdot \Omega < 0 \quad (\text{II.21})$$

Donc le coefficient de puissance C_p de la voilure pour ce type de l'évolution est négatif :

$$C_p < 0 \quad (\text{II.22})$$

II.4. Le multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante [15].

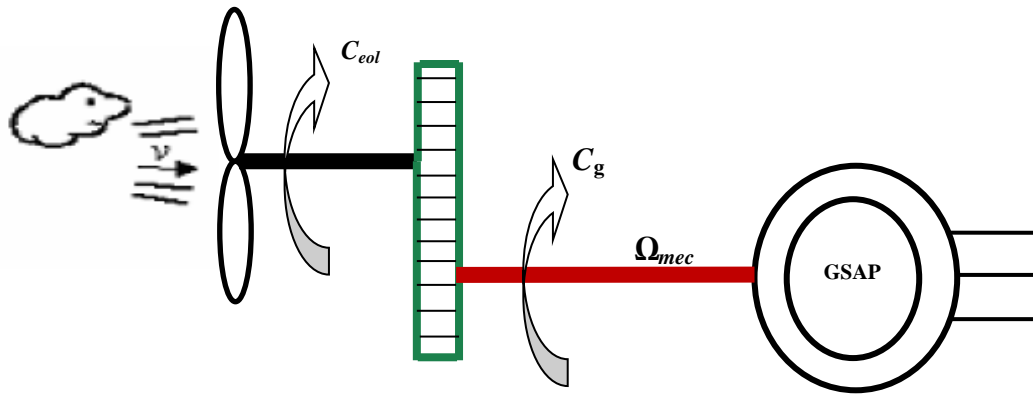


Figure II.16 : Schéma de la turbine éolienne.

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.23)$$

Avec: G gain de multiplicateur.

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

$$C_g = \frac{C_{eol}}{G} \quad (II.24)$$

II.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation est une méthode mathématique utilisée pour réduire la Machine électrique en un simple système d'équations. L'élaboration du modèle mathématique des machines est une étape nécessaire en vue de la commande et de la simulation de leurs différents régimes de fonctionnement.

II.5.1. Hypothèses simplificatrices [16]

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent obéit à l'hypothèse simplificatrice suivante :

- La répartition des forces magnétomotrice est sinusoïdale.
- L'effet de la température est négligé.
- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- L'effet d'amortissement au rotor est négligé.
- Les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées.
- Les phénomènes d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les couplages capacitifs entre les enroulements sont négligés.

II.5.2. Représentation de la MSAP dans le système d'axe triphasés a, b, c : [14][15][16]

Le modèle mathématique du MSAP est similaire à celui de la machine synchrone classique en considérant les conditions simplificatrices citées précédemment.

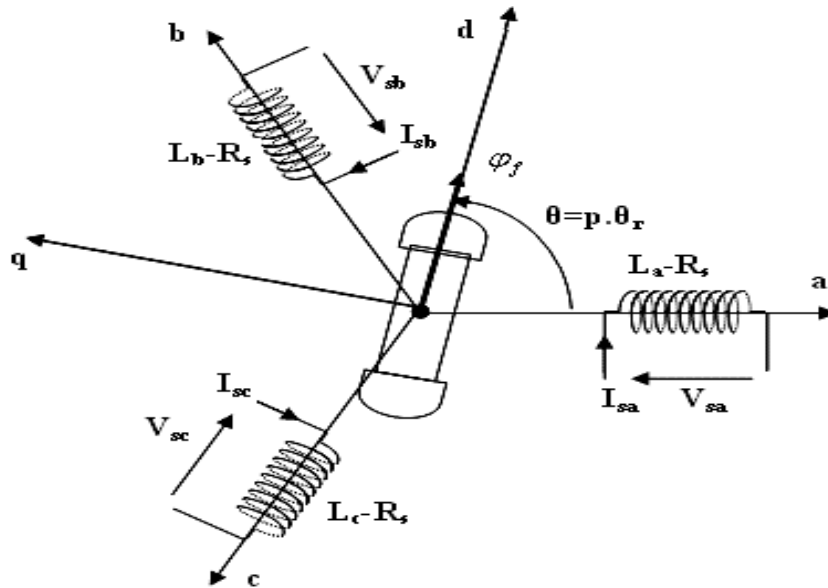


Figure II.17: Représentation schématique de la MSAP

1) Equations électriques

a) Au stator

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (\text{II.25})$$

On définit $[V_s]$, $[I_s]$, $[\phi_s]$ comme tensions, courants et flux triphasés du stator de la machine.

b) Au rotor

$$[V_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}[\phi_f] \quad (\text{II.26})$$

$[V_f]$, $[I_f]$, $[\phi_f]$ tension, courant et flux de la machine.

2. Équations magnétiques

a) Flux statorique

$$[\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sf}][I_f] \quad (\text{II.27})$$

b) Flux rotorique

$$[\phi_f] = [L_f][I_f] + [M_{fs}][I_s] \quad (\text{II.28})$$

La matrice $[L_{ss}]$ est carrée d'ordre 3. Elle contient des termes constants regroupés dans $[L_{s0}]$ et des termes variables dépendent de θ regroupés dans $[L_{s2}(\theta)]$. On pose :

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}] \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix}$$

et

$$[L_{s2}] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$[M_{fs}]$: est la matrice inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator

$$[M_{fs}] = M_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Les équations électriques deviennent :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][I_s] + [M_{sf}][I_f]) \quad (II.30)$$

$$[V_f] = [R_f][I_f] + \frac{d}{dt}([M_{fs}][I_s] + [L_f][I_f]) \quad (II.31)$$

II.5.3.Représentation de la MSAP dans le système d'axe d, q

Pour supprimer la non linéarité du système d'équations différentielles, on fait des changements de variables qui réduisent la complexité de ce système. Dans les machines électriques triphasées, ce changement de variable consiste à transformer les trois enroulements relatifs aux trois phases à des enroulements orthogonaux (d,q), tournant à une vitesse ω_r .

1) Model de Park

L'équation qui traduit le passage du système triphasé au système biphasé (d, q) est donnée par :

$$[X_{dq0}] = [P_\theta] * [X_{abc}] \quad (II.32)$$

Où $[X]$ représente la valeur courant, tension ou flux et θ représente la position du rotor. Les termes X_d , X_q représentent les composantes longitudinale et transversale des variables statoriques (tensions, courants, flux).

La matrice de transformation est donnée par:

$$[P_\theta] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Le facteur $\frac{2}{3}$ est choisit de façon à ce que la matrice $[P_\theta]$ soit orthogonale ce qui facilite le calcul de la matrice inverse. Alors $[P_\theta]^{-1}$ devient comme suit :

$$[P_\theta]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

L'angle θ est définit comme suit :

$$\theta(t) = \int_a^t \omega(t) dt \quad (\text{II.35})$$

On choisi le référentiel de Park. (d, q) lié au rotor.

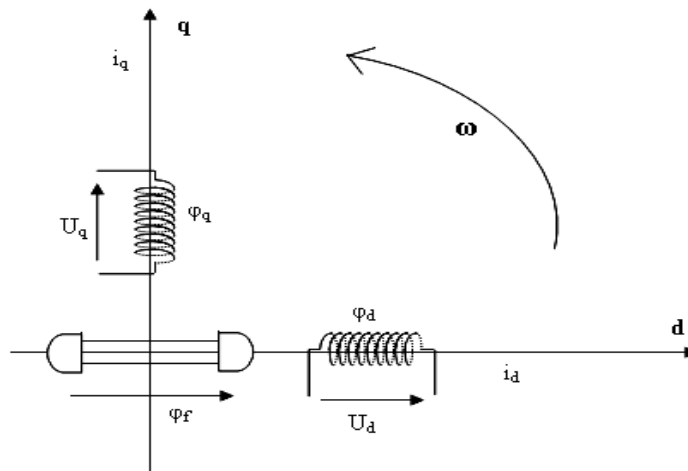


Figure II.18: Modèle biphasé de la MSAP

2) Équations électriques : Les composantes de la tension statorique sont données par.

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \\ U_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

3) **Équations magnétiques** : Les composantes du flux statorique sont données par:

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Où φ_f est le flux d'excitation constant des aimants permanents

D'où les équations électriques dans le plan «d q» s'écrivent :

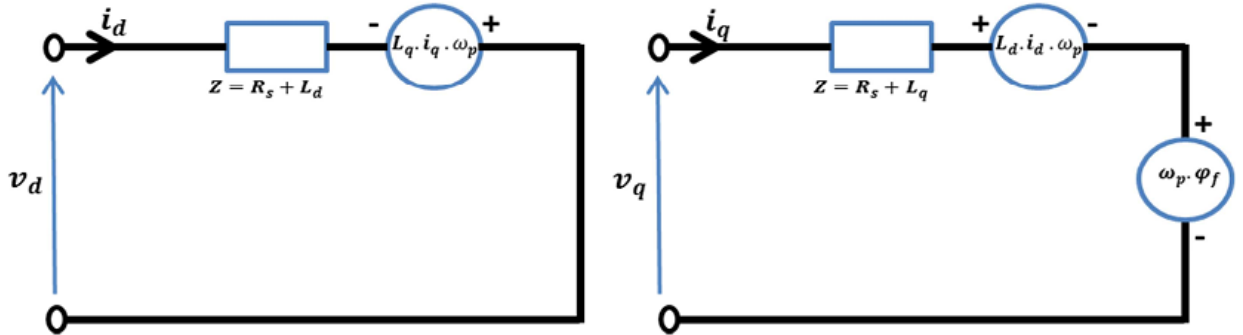


Figure II.19: Circuit équivalent de MSAP –convention moteur

Le modèle électrique d'une «MSAP» en fonctionnement générateur est reproduit à partir du modèle de la machine en mode moteur, en inversant le sens des courants « i_d » et « i_q » dans les repères de Park, le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu, peut s'écrire sous la forme suivante.

4) **Équations de la puissance et du couple électromagnétique**

L'expression du couple électromagnétique, est donné par :

$$C_e = \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{géo}} = P \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{géo}}$$

Dans la théorie du champ des machines électriques, le couple électromagnétique intervenant dans l'équation s'exprime par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

Où :

W_e : énergie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{géo}$: écart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator). Avec $\theta_{géo} = \frac{\theta_{ele}}{P}$

Selon Park, l'expression de la puissance s'écrit comme suit :

$$p(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II.38})$$

En remplaçant V_d et V_q par leur expression, il vient :

$$p(t) = \frac{3}{2}[(R_s(I_d^2 + I_q^2))] + \frac{3}{2}[I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt}] + \frac{3}{2}[\phi_d I_d - \phi_q I_q] \omega \quad (\text{II.39})$$

Où :

- Le 1^{er} terme : représente les chutes ohmiques (pertes par effet joule)
- Le 2^{ème} terme : représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée
- Le 3^{ème} terme : représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

On peut écrire donc :

$$C_e = \frac{3}{2} p(L_d - L_q) I_d I_q + \frac{3}{2} p(\phi_f I_q) \quad (\text{II.40})$$

5) Equation du mouvement : L'équation du mouvement de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + F\Omega_r = C_e - C_r \quad (\text{II.41})$$

Avec J : Moment d'inertie des masses tournantes

F : coefficient de frottement visqueux

Ω_r : vitesse mécanique de rotation ($\omega = p \Omega_r$)

C_e : couple électromagnétique ;

II.5.4. Mise sous forme d'équation d'état

Considérons les tensions (U_d, U_q), et le flux d'excitation (Φ_f) comme grandeurs de commande, les courants statoriques (I_d, I_q) comme variable d'état et le couple C_r comme perturbation. A partir des équations (1.12), on peut écrire le système d'équation suivant :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U]$$

$$[Y] = [C][X] + [D][U]$$

Avec :

[A] : La matrice fondamentale qui caractérise le système.

[B] : La matrice d'entrée.

[C] : La matrice de sortie.

[D] : La matrice de transmission direct.

[U] : Le vecteur de commande.

[X] : Le vecteur d'état.

Sous forme matricielle on peut écrire le système d'équations (II.36) comme suit :

$$\frac{d}{dt}[X] = [A][X] + [B][U]$$

D'où:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\phi_f}{L_q} \end{bmatrix} \omega \quad (\text{II.42})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega_r}{L_q} \end{bmatrix}$$

$$[C] = [1 \ 1] \quad [D] = 0$$

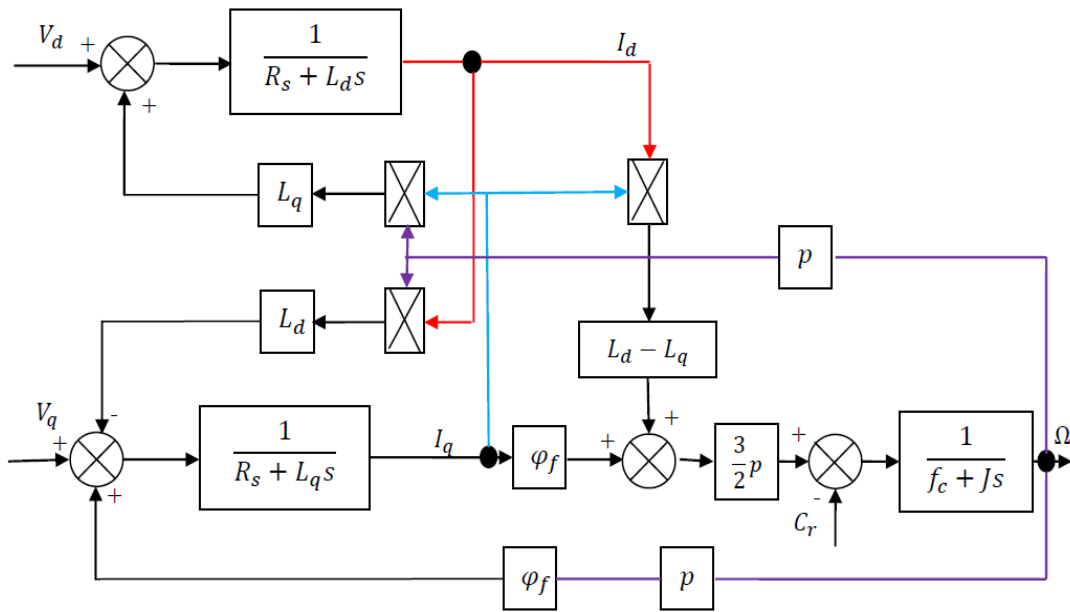


Figure II.20 : Schéma bloc de MSAP

II.5.5. Commande vectorielle de la MSAP

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct i_d à zéro est la plus répandue. Cela permet de simplifier l'expression du couple électromagnétique de l'équation (II.40) en une expression linéaire donnée par :

$$C_e = K_t \cdot I_q \quad (\text{II.43})$$

Ce dernier est alors réglé en agissant sur le courant en quadrature I_q , pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous devons :

- ✓ Poser une référence $I_{dref}=0$
- ✓ Poser une référence $I_{qref} = \frac{C_{eref}}{K_t}$

II.5.6. Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation

Afin de justifier le recours à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations (II.44-II.45)

$$V_d = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_q \quad (\text{II.44})$$

$e_q = \omega_r \cdot \varphi_q$: f.e.m de la machine sur l'axe q

$$V_q = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_d \quad (\text{II.45})$$

$e_d = \omega_r \cdot \varphi_d$: f.e.m de la machine sur l'axe d

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants I_d et I_q et de permettre de faire la régulation adéquate à chacun des deux séparément. Cette commande nous mène à un modèle de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. [16]

Les termes de couplage en $e_{d,q} = \pm \omega_r \cdot \varphi_{d,q}$ sont considérés comme des perturbations mesurables. Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (\text{II.46})$$

Avec

$T_e = \frac{L_s}{R_s}$: la constante de temps électrique

Si on tient compte de la perturbation, $G_s(p)$ sera sous la forme donnée en (II.47), en vertu du théorème de superposition

$$G_s(p) = \frac{i_{d,q}(p)}{V_{d,q}(p) + e_{d,q}(p)} \quad (\text{II.47})$$

Afin d'imposer la référence du courant sur les axes d et q on utilise des régulateur PI. Les deux boucles de régulation des courants I_d et I_q sont données par les schémas blocs suivants :

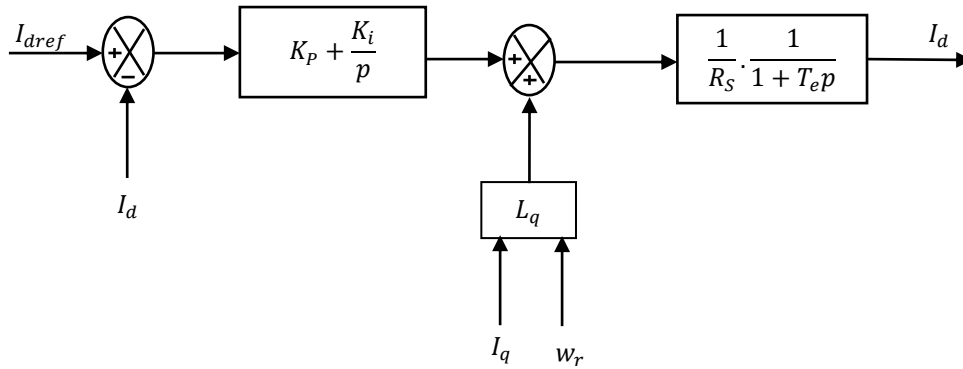


Figure II.21 : Boucle de régulation du courant I_d

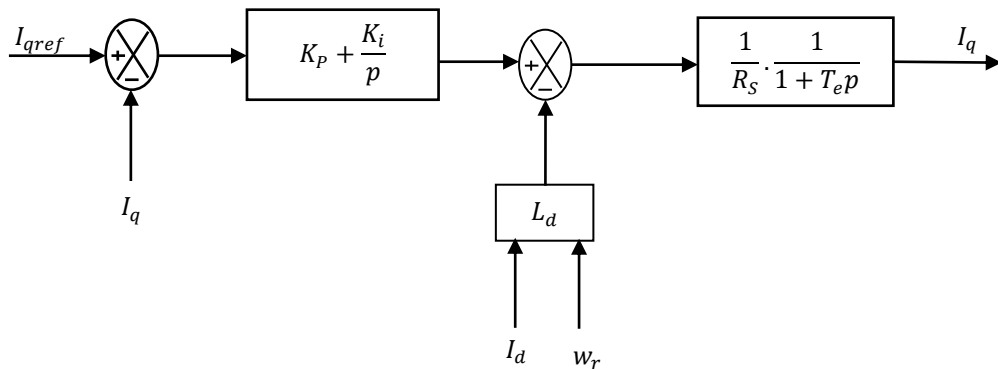
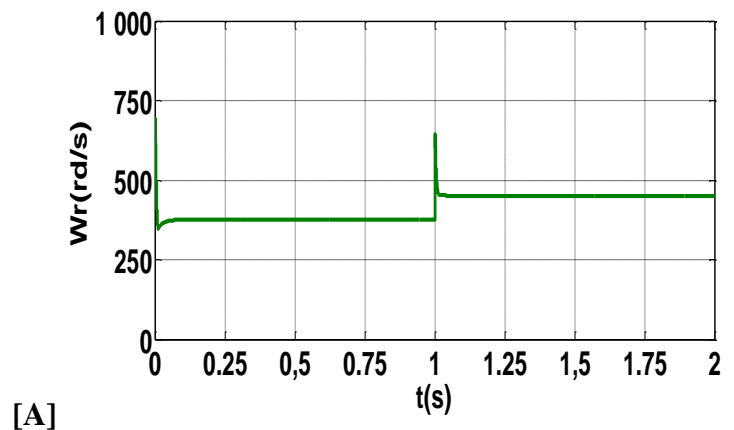
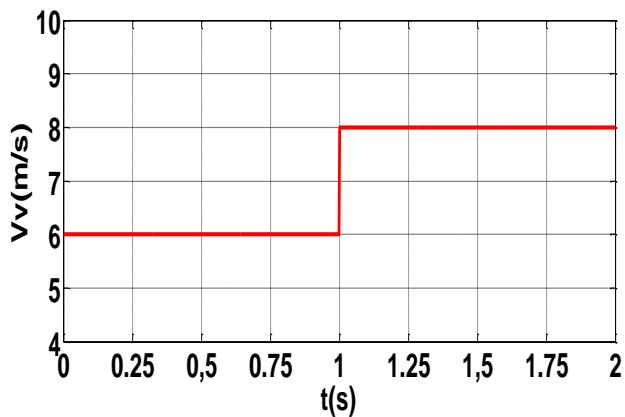


Figure II.22 : Boucle de régulation du courant I_q

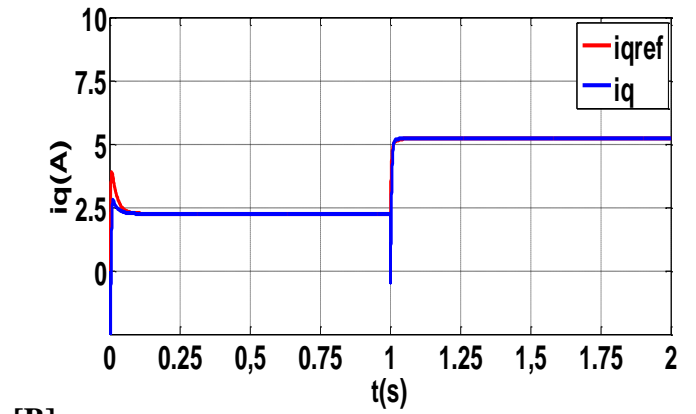
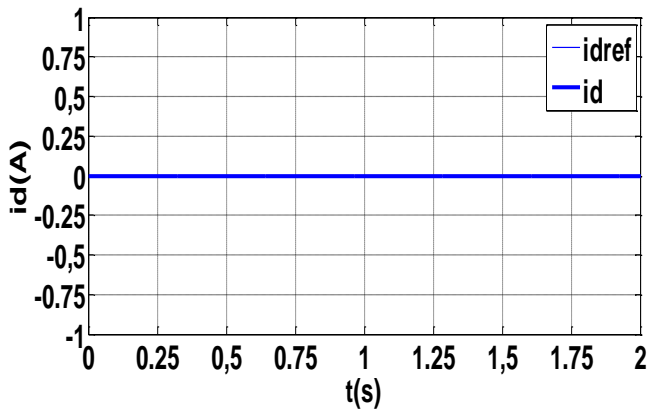
Les paramètres des régulateurs PI seront calculés en détails dans l'annexe (B).

II.5.7. Résultats de simulation

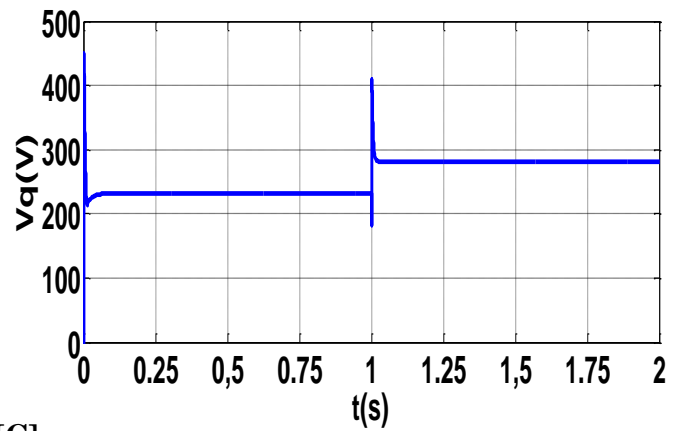
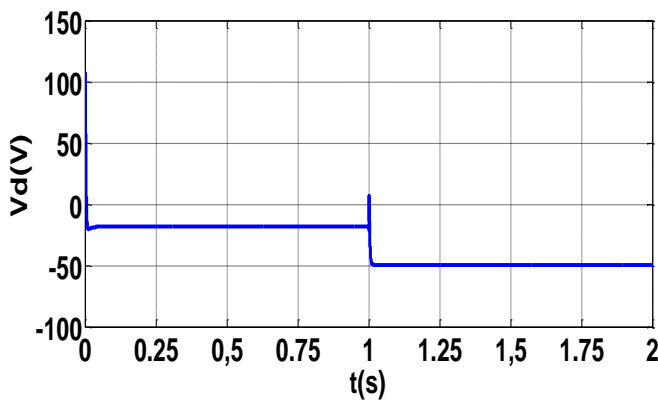
L'association de la génératrice à la turbine permet la génération de l'énergie électrique, c'est pourquoi nous avons procédé à des simulations sous Matlab-Simulink afin de voir le comportement de la génératrice synchrone en visualisant sa vitesse de rotation ainsi que les tensions et courants suivants les axes d et q, pendant le fonctionnement en régime permanent.



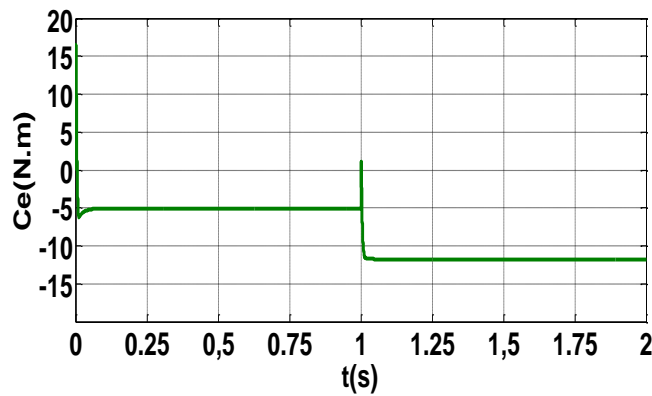
[A]



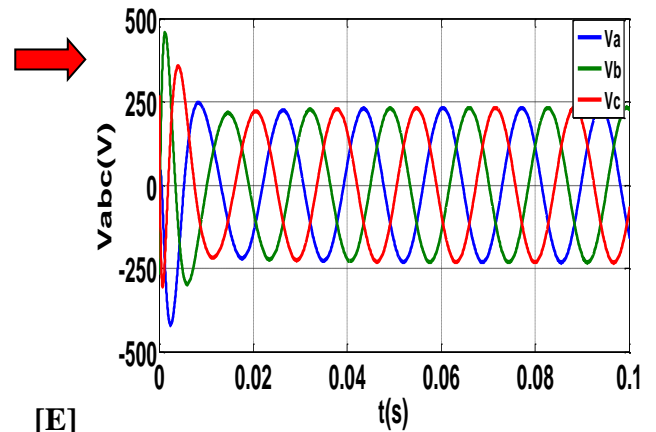
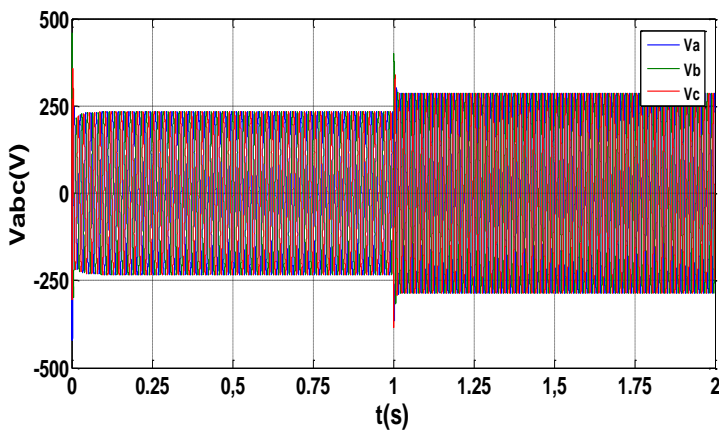
[B]



[C]



[D]



[E]

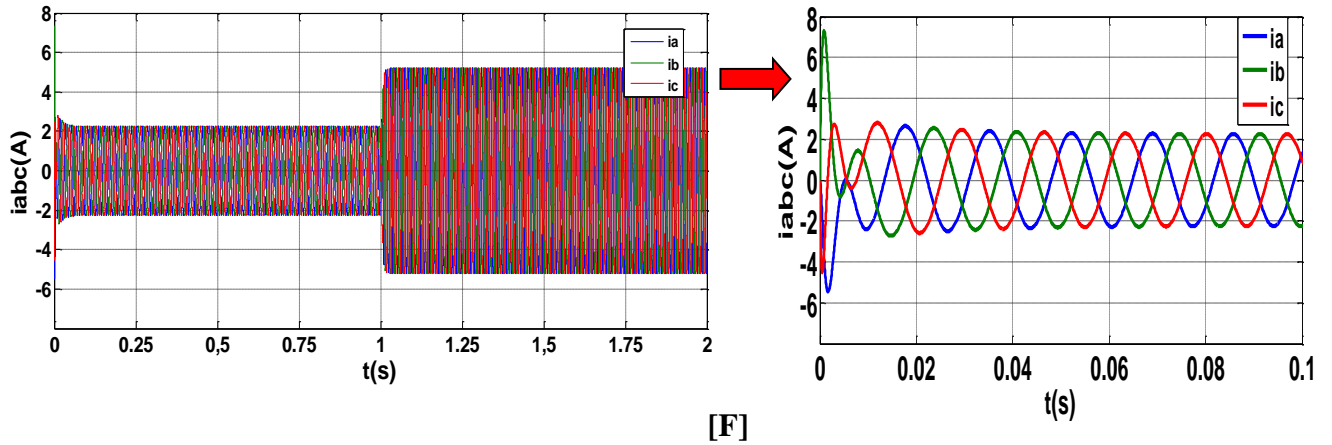
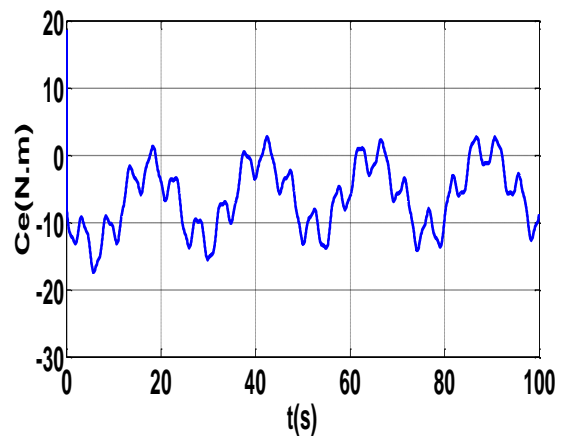
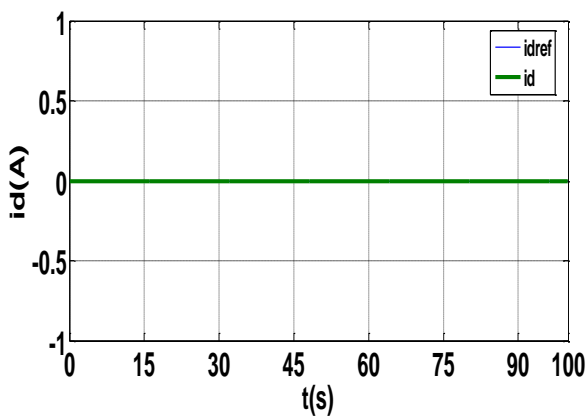


Figure II.23 : [A] : Vitesse du vent- vitesse de rotation, [B] : Composantes i_d et i_q ,
 [C] : Composantes V_d et V_q , [D] : Couple électromagnétique,
 [E] : Tensions statoriques V_{abc} , [F] : Courants statoriques i_{abc} .

Lors de la variation brusque de la vitesse du vent entre 6 m/s et 8 m/s les paramètres caractérisant le fonctionnement de la GSAP suivent ce changement avec un régime transitoire très court. Les grandeurs électriques sur les axes d et q suivent leurs références grâce à la stratégie de commande et au calcul exact des régulateurs PI utilisés.

Pour suivre le fonctionnement réel de la GSAP liée à la turbine nous allons appliquer une fonction variable dans le temps pour la valeur de la vitesse du vent, ainsi nous pouvons juger l'efficacité de notre commande.



[A]

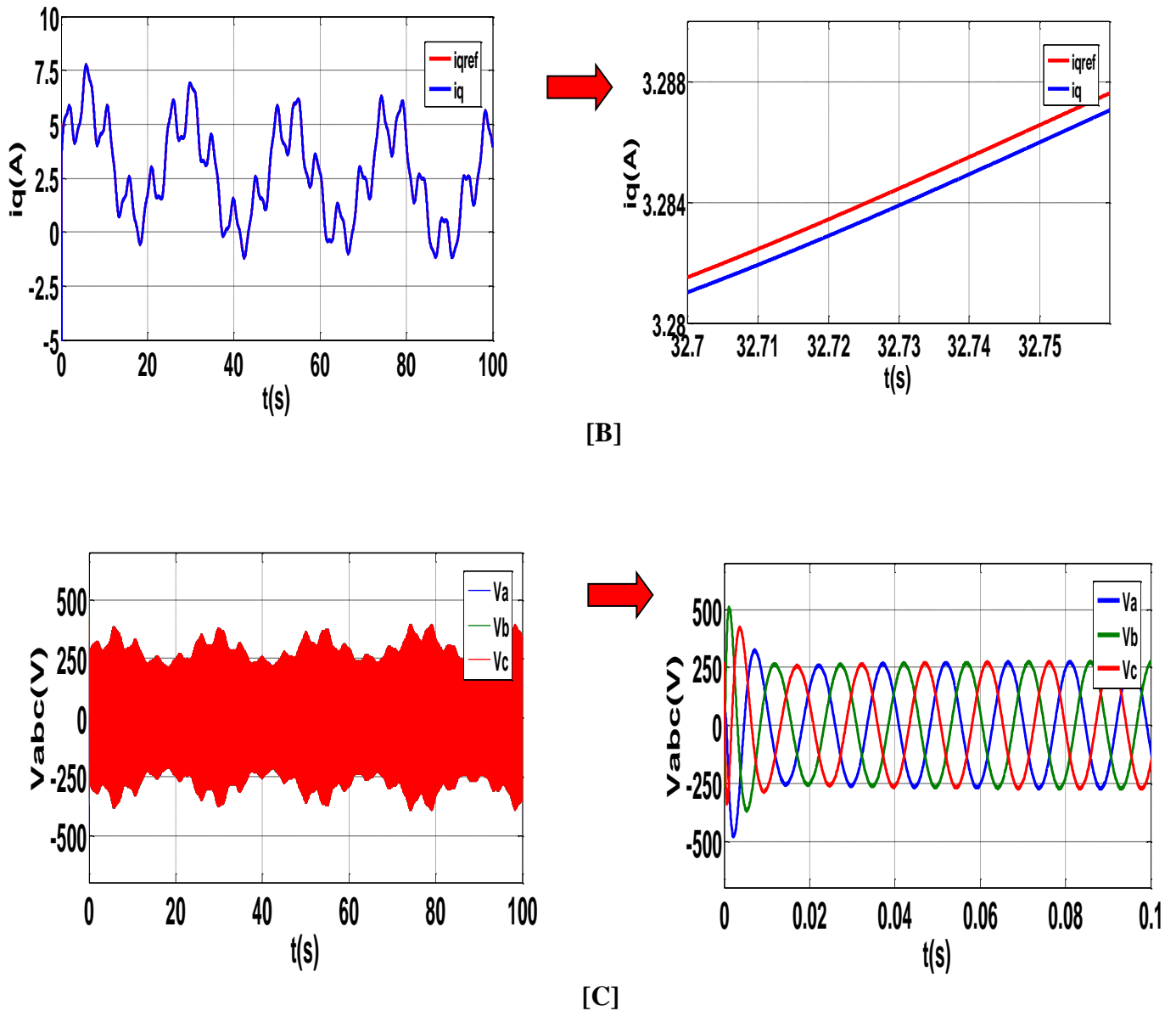


Figure II.24 : [A] : Le courant i_d et le couple électromagnétique, [B] : Le courant i_q ,
 [C] : Tensions statoriques V_{abc} .

II.6. Modélisation de l'association MSAP – Convertisseurs électroniques

Grâce au développement très rapide de l'électronique de puissance, offrant à la fois, une grande capacité, et une bonne qualité de puissance, avec le moindre coût; le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation des convertisseurs de puissance. Des nouveaux types de génératrices associées à ces convertisseurs sont en cours de développement. L'utilisation des convertisseurs de puissance dans le système de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement, d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée [15].

Plusieurs structures de conversion de l'énergie électrique fournie par la génératrice éolienne à vitesses variables peuvent être utilisées dans le but d'avoir une tension de fréquence et amplitude constants du côté réseau. Ces structures sont basées sur des dispositifs électroniques, et se sont caractérisées par leurs performances et inconvénients sur les plans techniques et économique.

Pour notre étude nous avons opté pour la structure la plus utilisée de nos jours à savoir un convertisseur composé d'un redresseur et d'un onduleur séparés par un bus continu (Anglais back to back converter). Le pont redresseur composé de six transistors GTO avec leurs diodes antiparallèles permet d'avoir une structure bidirectionnelle en puissance, et de fournir le courant nécessaire demandé par la charge [15] [16].

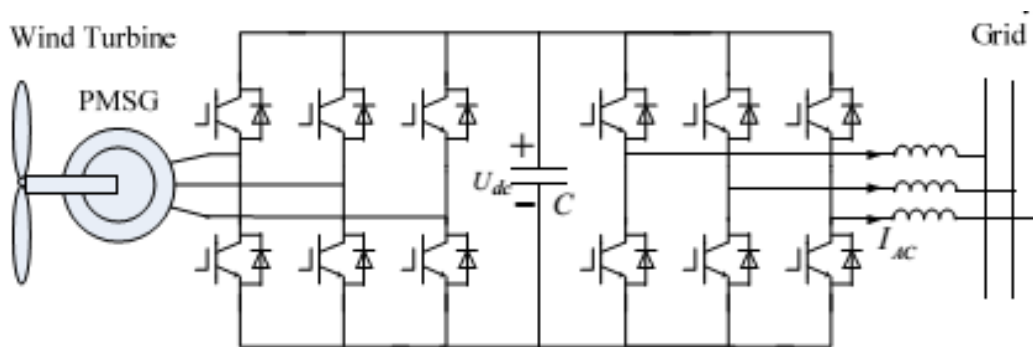


Figure II.25 : Schéma du convertisseur choisi

II.6.1. Modèle mathématique du redresseur commandé [10],[15]

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI - charge), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.

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

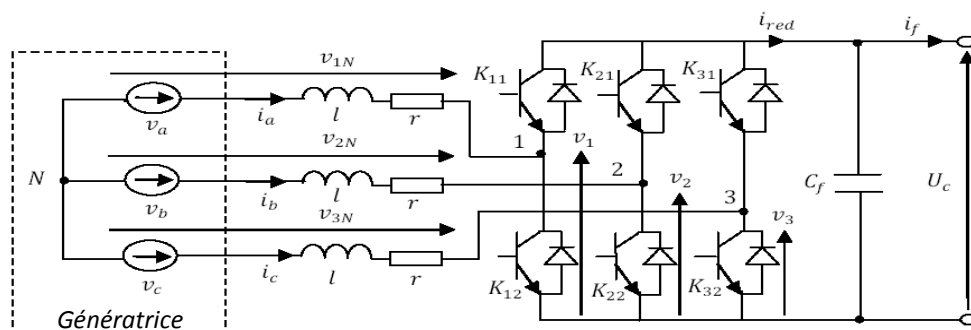


Figure II.26 : Convertisseur AC-DC triphasé

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

$$S = \begin{cases} +1, \bar{S} = -1 \\ -1, \bar{S} = +1 \end{cases} \quad \text{pour } S = a, b, c$$

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de:

S_J, V_{dc} et les courants d'entrée i_a, i_b, i_c .

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II.48})$$

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

$$\begin{aligned} U_{Sab} &= (S_a - S_b) \cdot V_{dc} \\ U_{Sbc} &= (S_b - S_c) \cdot V_{dc} \\ U_{Sca} &= (S_c - S_a) \cdot V_{dc} \end{aligned} \quad (\text{II.49})$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

Avec:

$$\begin{aligned} V_{Sa} &= \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} \cdot V_{dc} \\ V_{Sb} &= \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} \cdot V_{dc} \\ V_{Sc} &= \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} \cdot V_{dc} \end{aligned} \quad (\text{II.51})$$

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme suit :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_c \quad (\text{II.51})$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire :

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (\text{II.52})$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par:

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (\text{II.53})$$

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (\text{II.53})$$

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (\text{II.53})$$

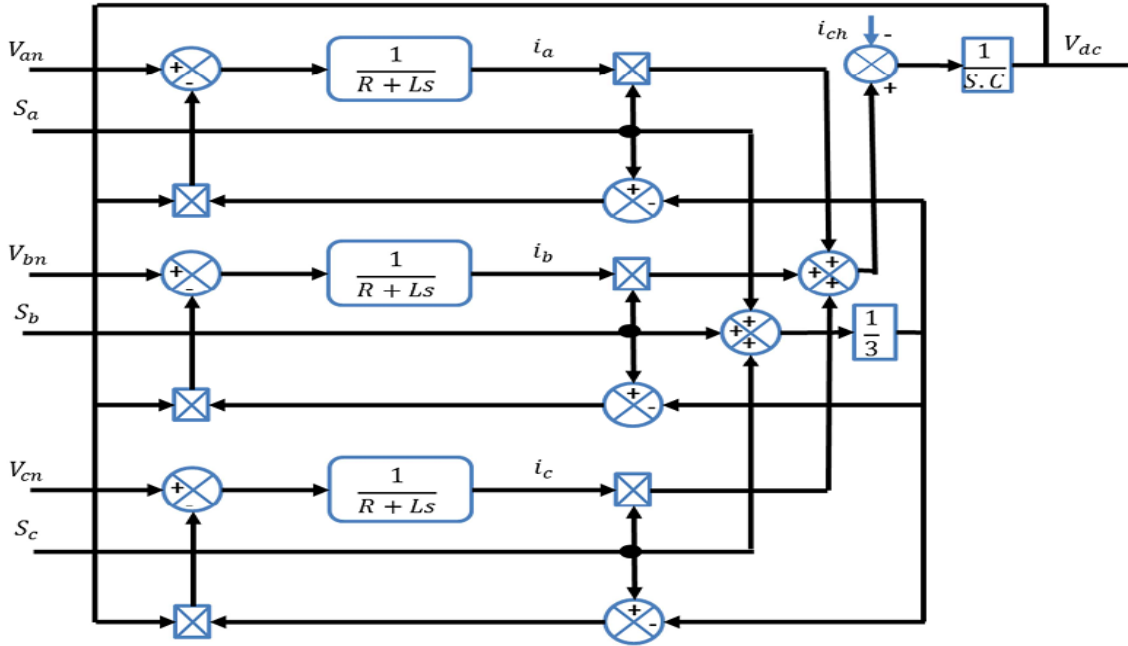


Figure II.27 : Schéma fonctionnel du redresseur dans les coordonnées triphasées normales[17].

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones d q sont:

$$V_D = R \cdot i_d + L \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L \cdot i_q + V_{sd} \quad (\text{II.52})$$

$$V_Q = R \cdot i_q + L \cdot \frac{di_q}{dt} - \omega \cdot L \cdot i_d + V_{sq} \quad (\text{II.53})$$

$$C \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} = S_d \cdot i_d + S_q \cdot i_q - i_{ch} \quad (\text{II.54})$$

Avec:

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}} (2 \cdot S_a - S_b - S_c) \cdot \cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{II.55})$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cdot \cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{6}} (2 \cdot S_a - S_b - S_c) \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{II.56})$$

II.6.2. Modèle mathématique de l'onduleur

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à MLI) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, à fréquence fixe ou variable. Il est constitué dans le domaine des puissances élevées par des transistors ou des thyristors GTO ; surtout dans le domaine des entraînements électriques à vitesse variable. Pour les puissances moins élevées, on utilise les transistors à commutation rapide [18], [19].

Cet onduleur à commutations commandées est constitué de trois branches disposées de la même manière que dans le redresseur commandé voir figure (II.28) :

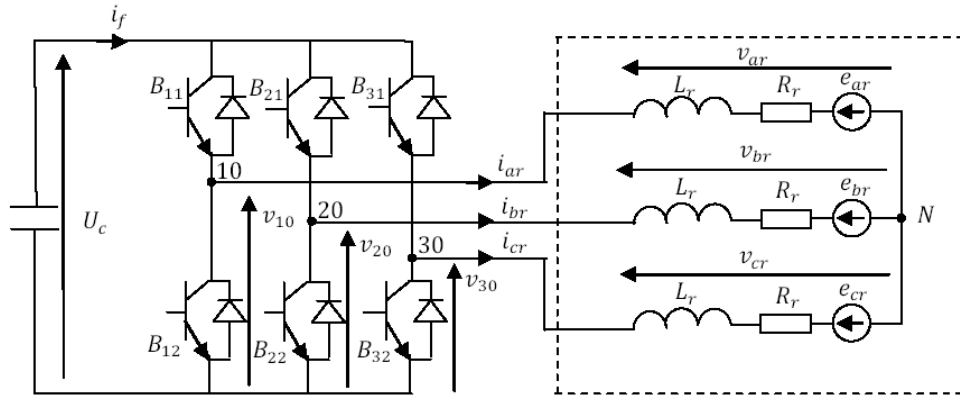


Figure II.28 : Schéma de principe de l'onduleur triphasé [17].

De la même manière que pour le redresseur à commutation forcée, on introduit d'autres variables caractérisant l'état des interrupteurs qui prennent 1 si l'interrupteur B_{j1} est fermé ou 0 s'il est bloqué, et on déduit l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

Le courant filtré peut s'écrire :

$$i_f = f_{11}i_{ar} + f_{21}i_{br} + f_{31}i_{cr} \quad (\text{II.58})$$

Ces variables de commande f_{i1} présentent aussi des signaux logiques déduits de l'application de la technique de commande à MLI. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés comme pour le redresseur commandé en courant par une comparaison à hystérésis entre les courants de sortie i_{abcr} et les courants de référence $i_{abcr-ref}$. Les états des interrupteurs sont déduits selon les règles suivantes :

Si $i_{ar-ref} - i_{ar} > \Delta i$ alors $f_{11} = 0$ et si $i_{ar-ref} - i_{ar} < -\Delta i$ $f_{11} = 1$

Si $i_{br-ref} - i_{br} > \Delta i$ alors $f_{21} = 0$ et si $i_{br-ref} - i_{br} < -\Delta i$ $f_{21} = 1$

Si $i_{cr-ref} - i_{cr} > \Delta i$ alors $f_{31} = 0$ et si $i_{cr-ref} - i_{cr} < -\Delta i$ $f_{31} = 1$

II.7. Commande de la chaîne éolienne

II.7.1. L'association MSAP – Redresseur commandé – charge

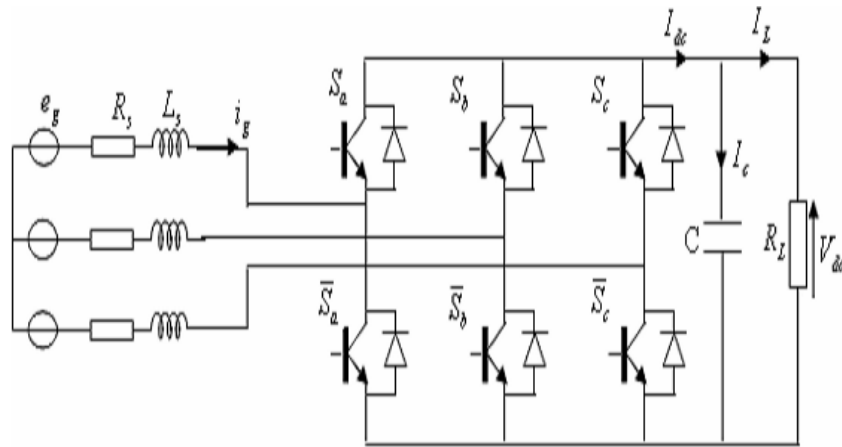


Figure II.29: Schéma de l'association MSAP – Redresseur MLI

Le schéma bloc de la commande du générateur éolien est représenté à la figure (II.30). La commande de ce système basée sur deux fonctions, l'algorithmique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) et le contrôle du bus continue à la sortie de redresseur. Le principe de contrôle des courants par hystérésis est celui qui est utilisé dans le présent projet. Ce type de commande est robuste et facile à mettre en œuvre.

Elle possède un bon temps de réponse en régime dynamique, une bonne stabilité et une bonne précision. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis.

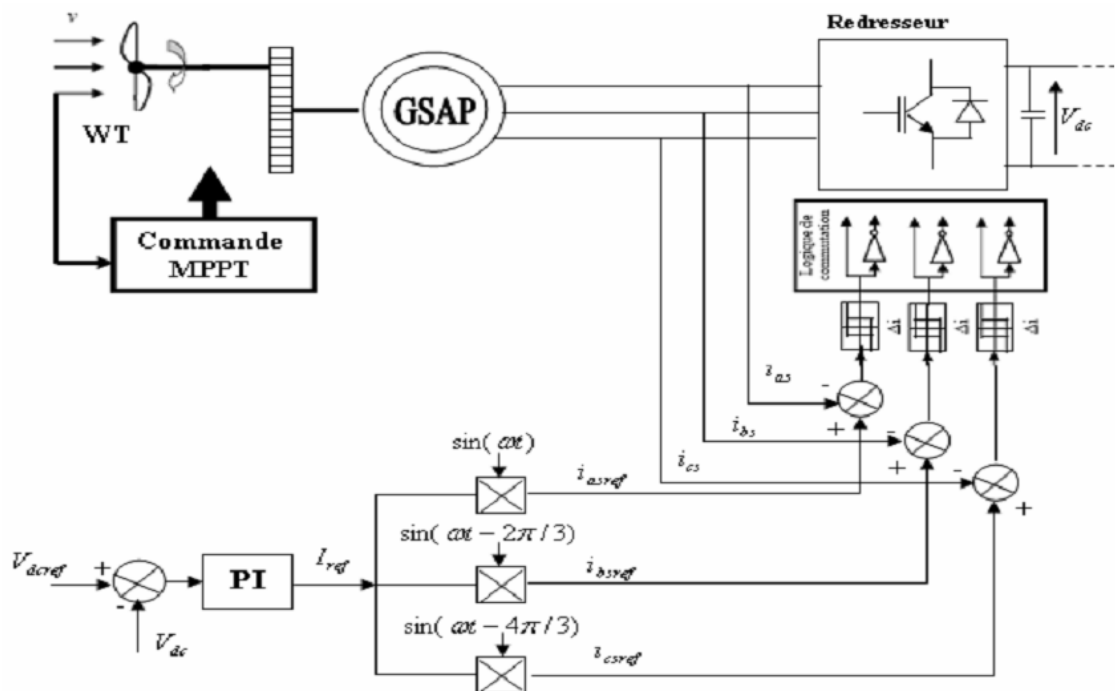
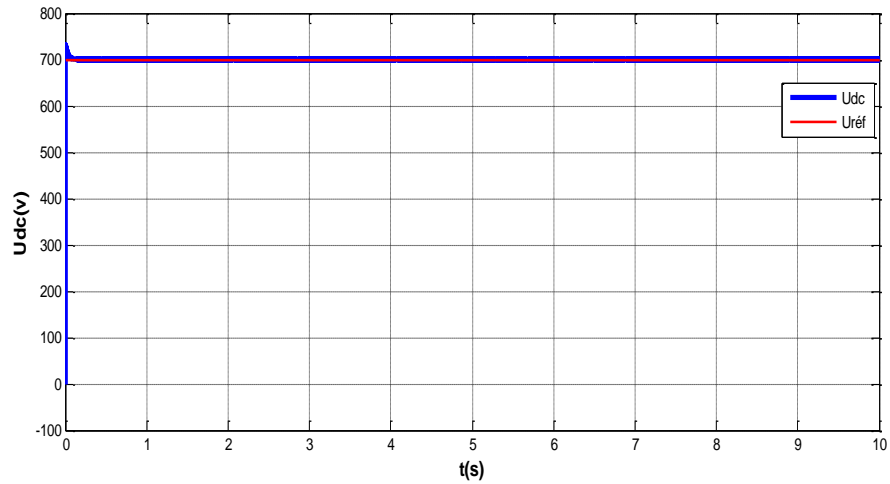
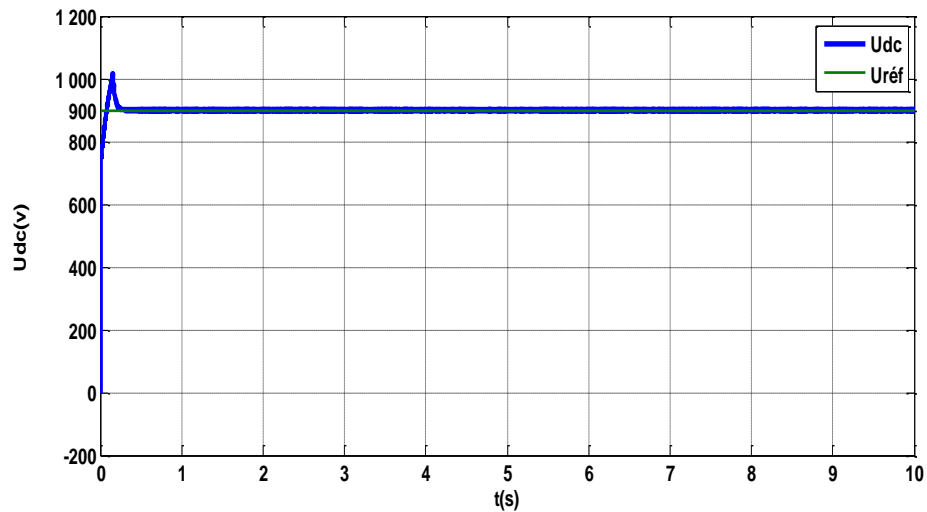


Figure II.30: Synoptique de la commande du redresseur et de la machine synchrone

a) Résultats de simulation

**Figure II.31:** Tension redressée avec sa référence $U_{dc-ref}=700V$ **Figure II.32:** Tension redressée avec sa référence $U_{dc-ref}=900V$

D'après les résultats obtenus, on remarque la tension redressée suit parfaitement la référence et cela grâce au bon contrôle du bus continu.

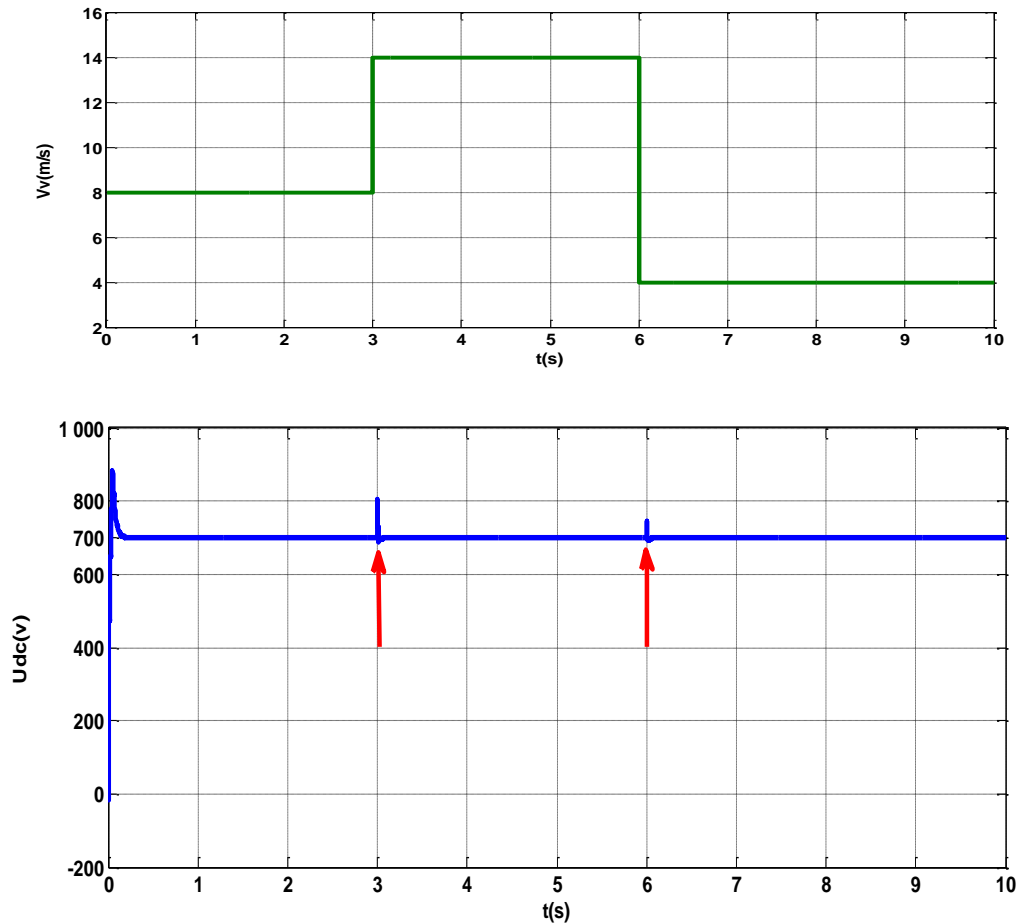


Figure II.33: Tension redressée lors de la variation brusque de la vitesse du vent

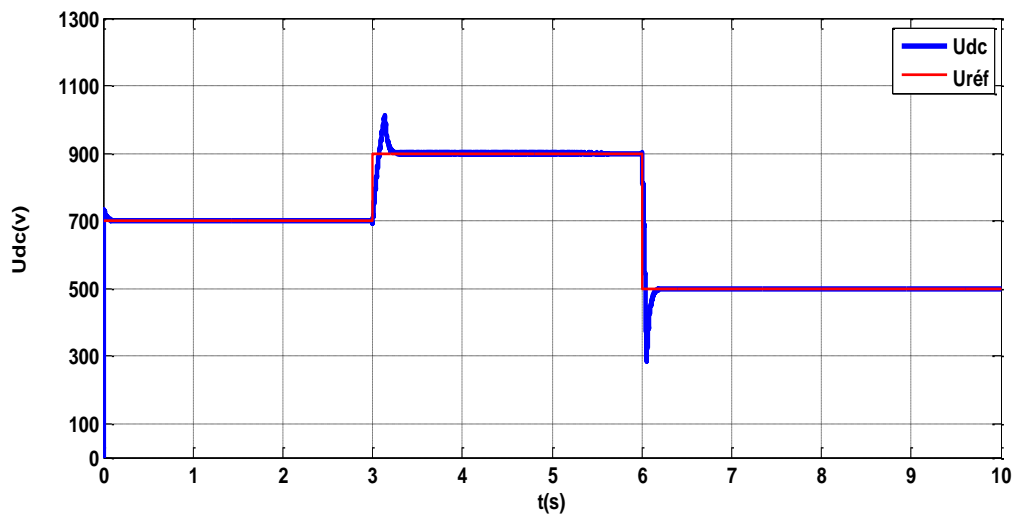


Figure II.34: Tension redressée lors de la variation brusque de la tension de référence

Les figures précédentes (II.33) et (II.34) montrent que malgré les changements des valeurs que se soit de vitesse du vent ou de la valeur de la référence, la tension redressée rejoint toujours sa référence avec des temps du transitoire très courts.

II.7.2. L'association MSAP – Redresseur commandé – Onduleur -Réseaux

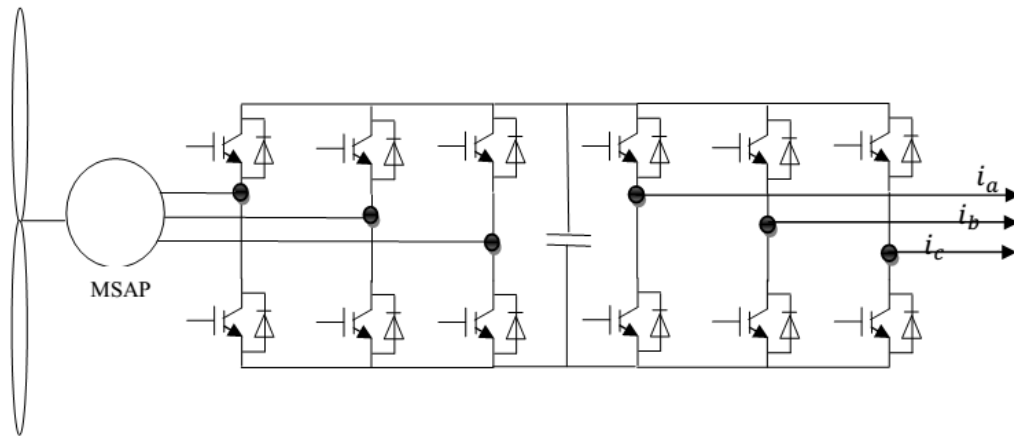


Figure II.35 : Machine synchrone entraînée par une turbine éolienne et reliée au réseau par Un dispositif redresseur-onduleur

L'évolution de la tension du bus continu peut être déduite de l'expression (II.55) :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (I_{dc} - I_1) \tag{II.55}$$

I_1 : courant à l'entrée de l'onduleur.

I_{dc} : courant à la sortie du redresseur.

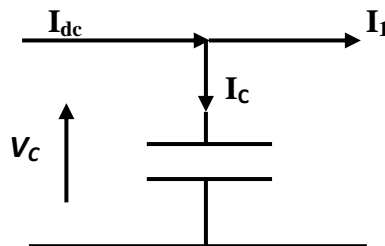


Figure II.36 : Représentation des différents courants à la sortie du redresseur

a. Commande du bus continu DC

La tension aux bornes du condensateur C est donnée par l'équation II.55. La tension de référence du bus continu V_{dc-ref} est comparée à celle mesurée aux bornes du condensateur équivalent à V_{dc} . Le correcteur Proportionnel Intégral (PI) permet de maintenir une tension constante du bus continu en générant la référence du courant à injecter dans le condensateur.

Pour pouvoir contrôler la tension du bus continu, il est important de déterminer l'expression du courant à l'entrée de l'onduleur [21][22].

$$I_1 = \frac{1}{2} (i_{rd} \cdot V_{rd} + i_{rq} \cdot V_{rq}) \tag{II.55}$$

Le schéma de la figure (II.37) illustre la commande du bus continu

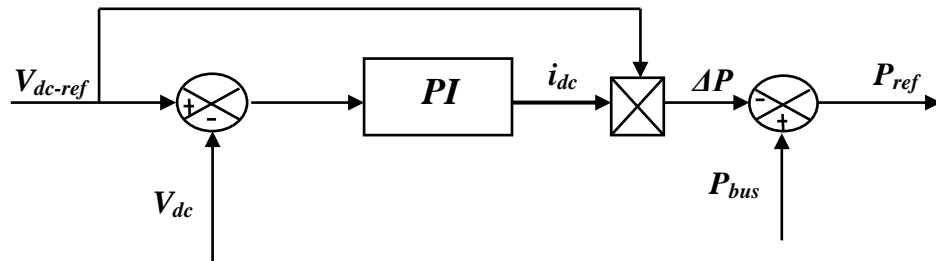


Figure II. 37: Commande du bus continu DC lors de l'injection au réseau

a)-Résultats de simulation

Le fonctionnement du dispositif complet a été simulé sous environnement MATLAB®-Simulink®. En utilisant les paramètres électriques de la machine (voirannexe)

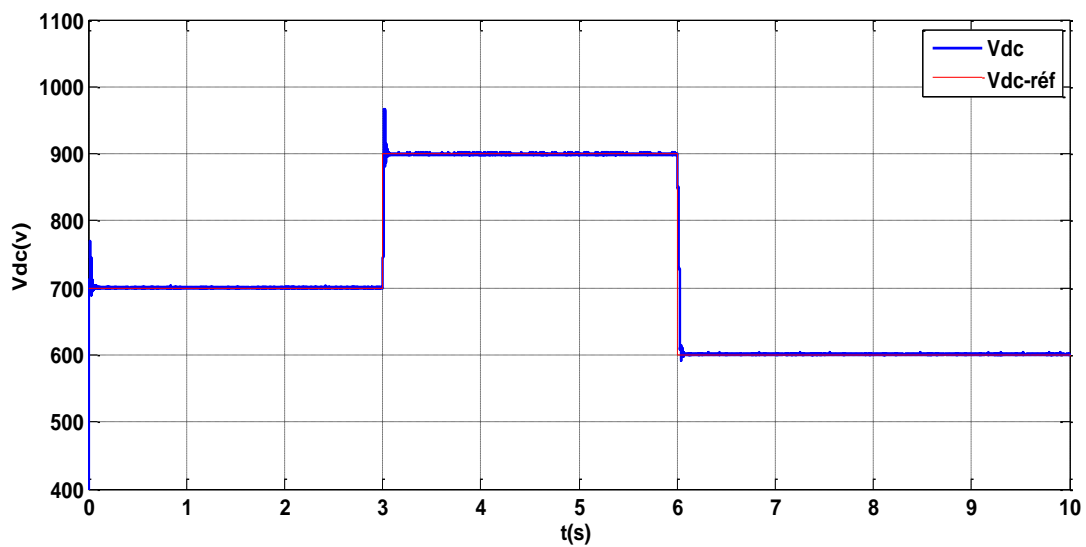


Figure II.38: Tension redressée lors de la variation brusque de la tension de référence avec une vitesse du vent constante $V_v=7\text{m/s}$

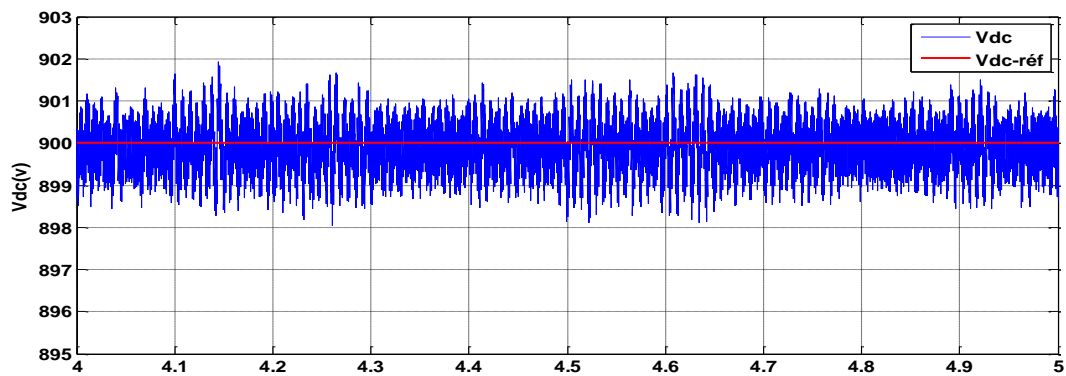


Figure II.39: Zoom de la tension redressée lors de la variation brusque de la tension de référence

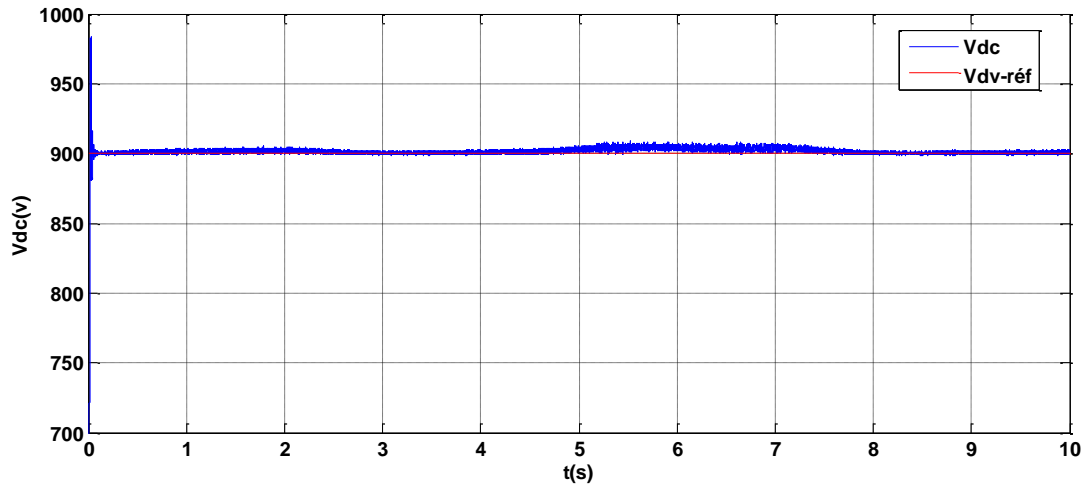


Figure III.40 : Tension redressée avec une vitesse du vent variable et une tension de référence

$$V_{dc-réf} = 900V$$

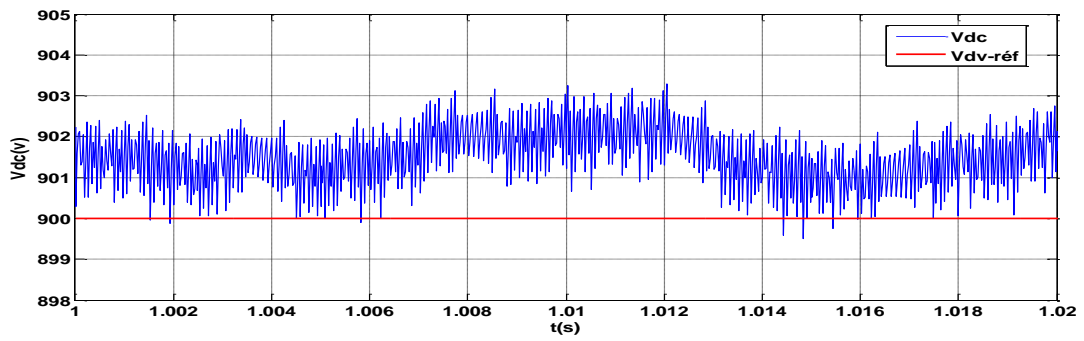


Figure II.39: Zoom de la tension redressée lors de la variation de la vitesse du vent avec

$$V_{dc-réf} = 900V$$

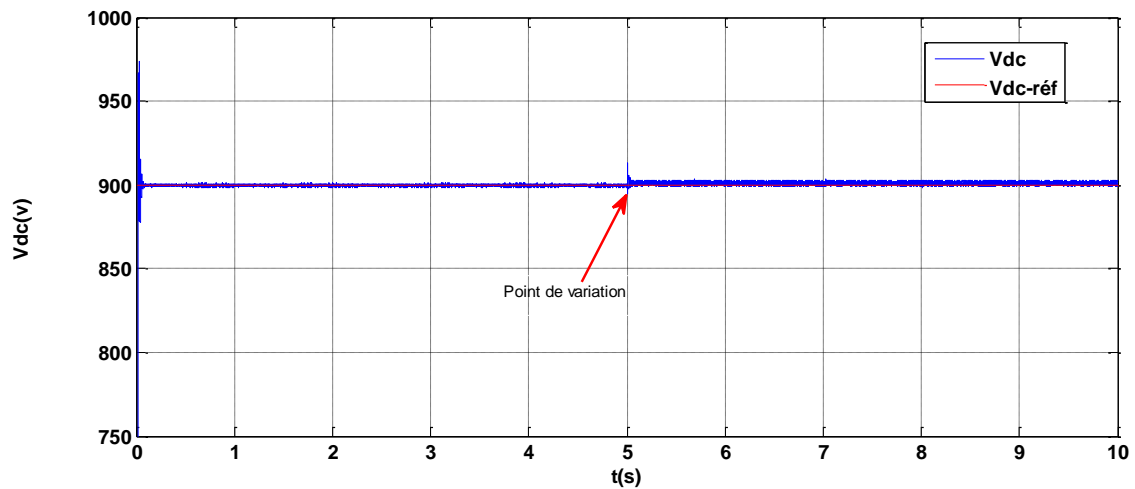


Figure II.40 : Tension redressée lors de la variation brusque de la vitesse du vent

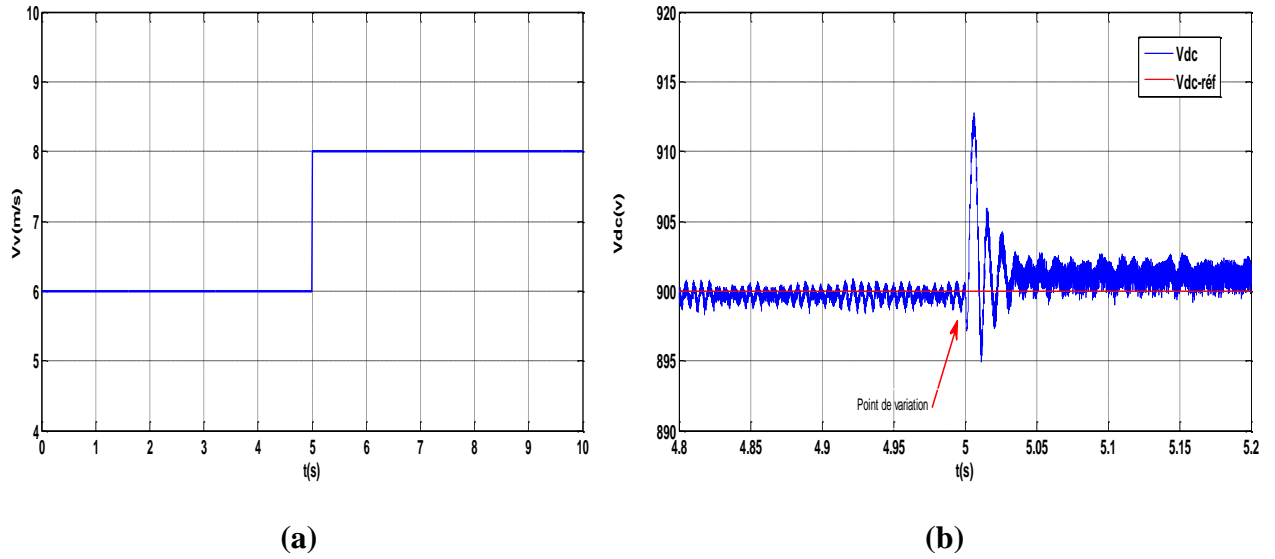


Figure II.41 : (a) – Variation brusque de la vitesse du vent. (b) – Zoom de la tension redressée lors de la variation brusque de la vitesse du vent.

A la lumière des résultats de simulation obtenus, nous concluons que la réponse de la tension à la sortie du redresseur (redressée) à une variation de vitesse est relativement rapide et ne dépasse pas 2 % de la valeur de référence, lors des perturbations.

II.7.3. Stratégie de commande découplée des puissances active et réactive

Après avoir régulé la tension du bus continu, la puissance électromagnétique extraite du vent, doit être injectée au réseau via l'onduleur auquel il est connecté. Le schéma de la Figure (II.42) illustre le système global d'injection ainsi que sa commande.

Les puissances active et réactive dans le repère d q sont exprimées par les deux équations suivantes [41]

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq} \\ Q_r = V_{rd}i_{rq} - V_{rq}i_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Parce que la tension efficace du réseau est orientée suivant un seul axe alors :

$$V_r = V_{rd} + j0 \quad (\text{II.52})$$

Donc d'après les équations (II.50) et (II.52) les puissances active et réactive s'expriment par les relations :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}i_{rd} \\ Q_r = -V_{rd}i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

La commande de ces puissances est élaborée par le schéma de commande suivant :

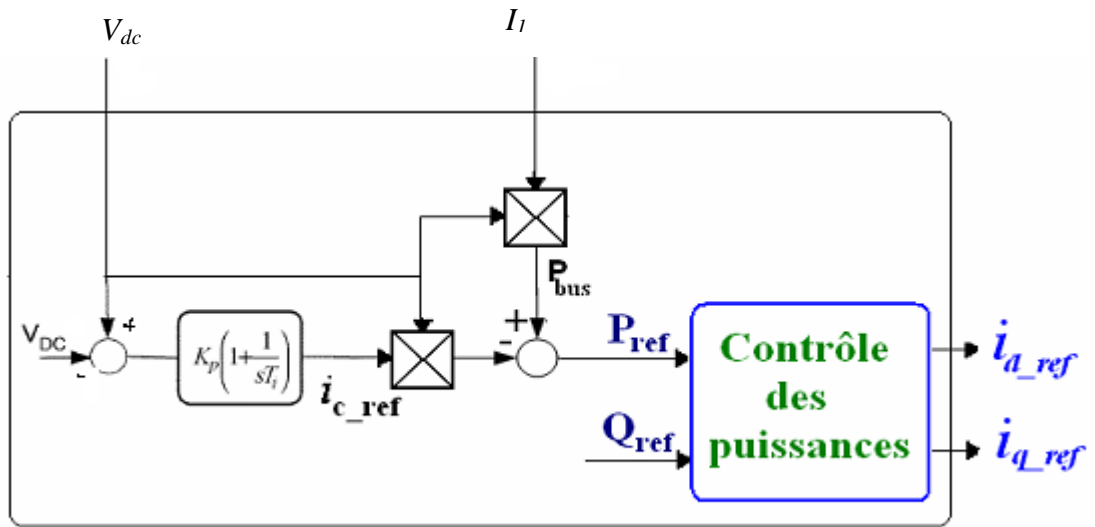


Figure II.41 : Commande de la puissance active et réactive

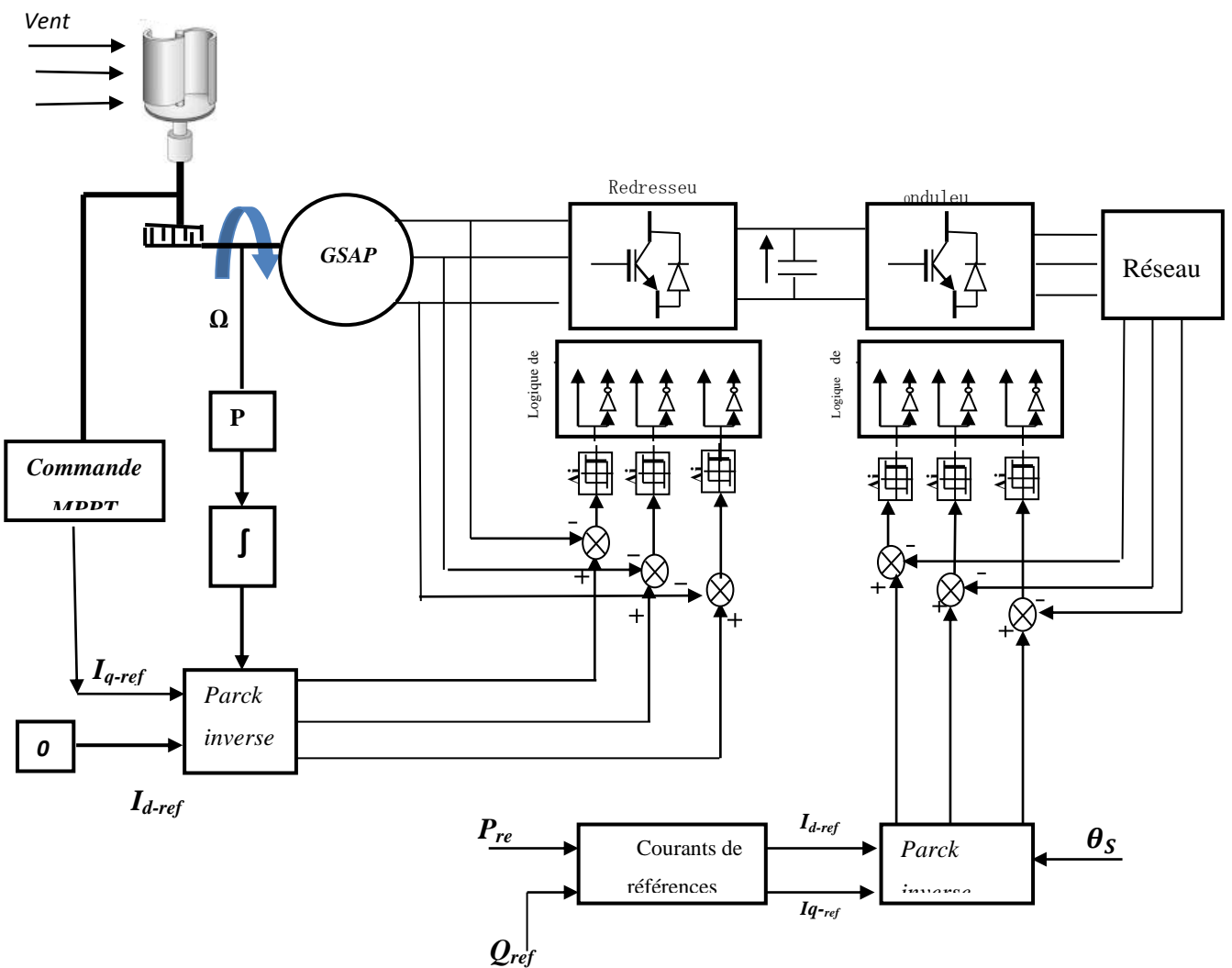


Figure II.42 : Schéma synoptique de la commande de la chaîne éolienne

II.7.4. Résultats de simulation et interprétation

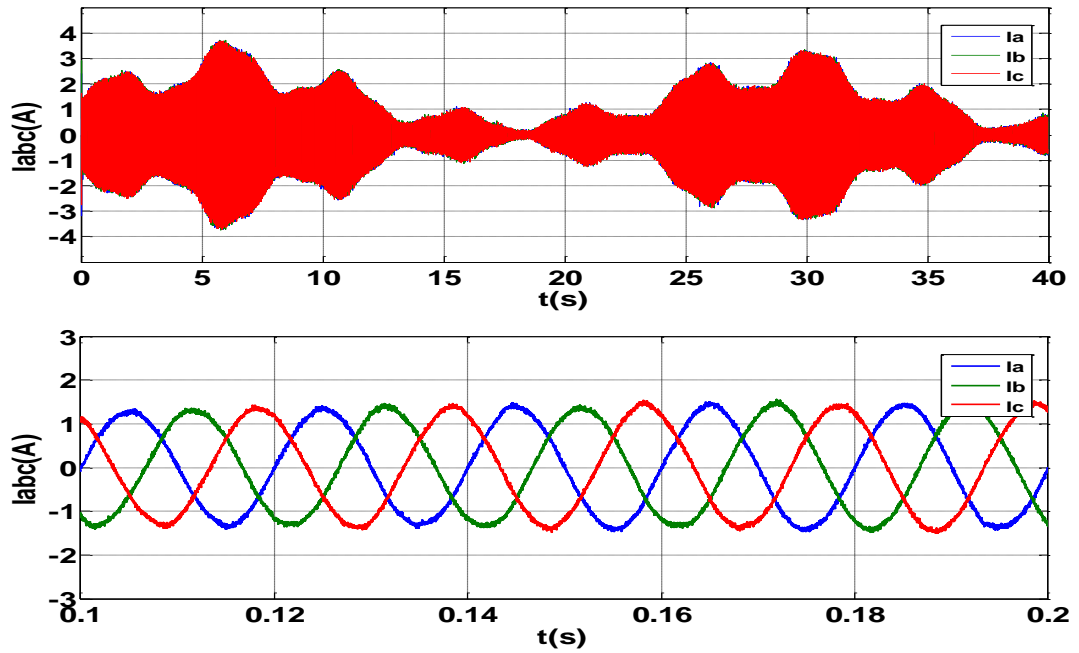


Figure II.43 : Variation des courants I_{abc} injectés dans le réseau

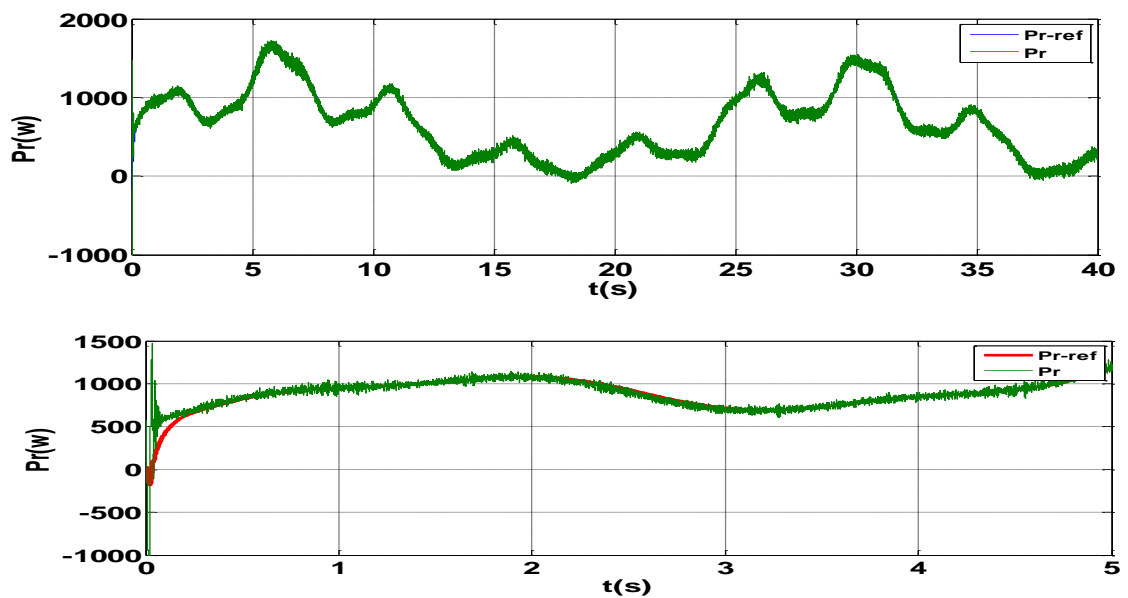


Figure II.44 : Variation de la puissance active injectée dans le réseau

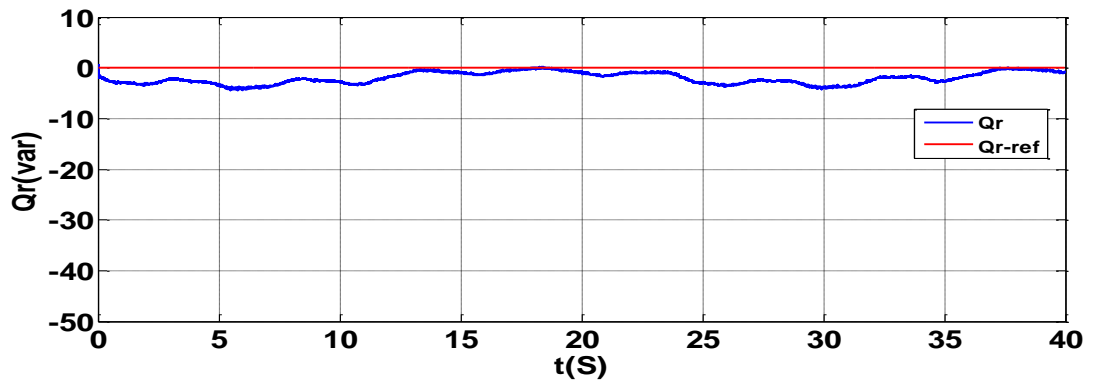


Figure II.45 : Variation de la puissance réactive injectée dans le réseau

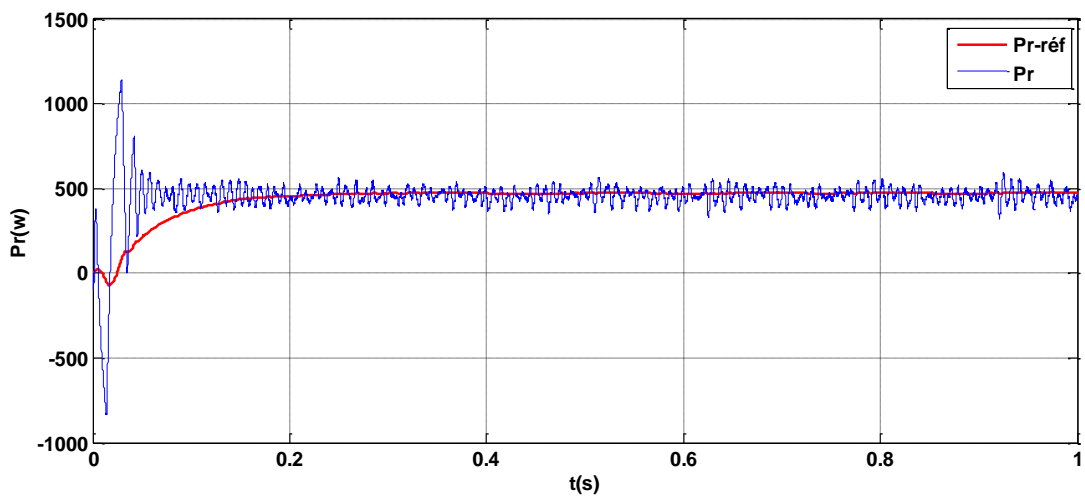
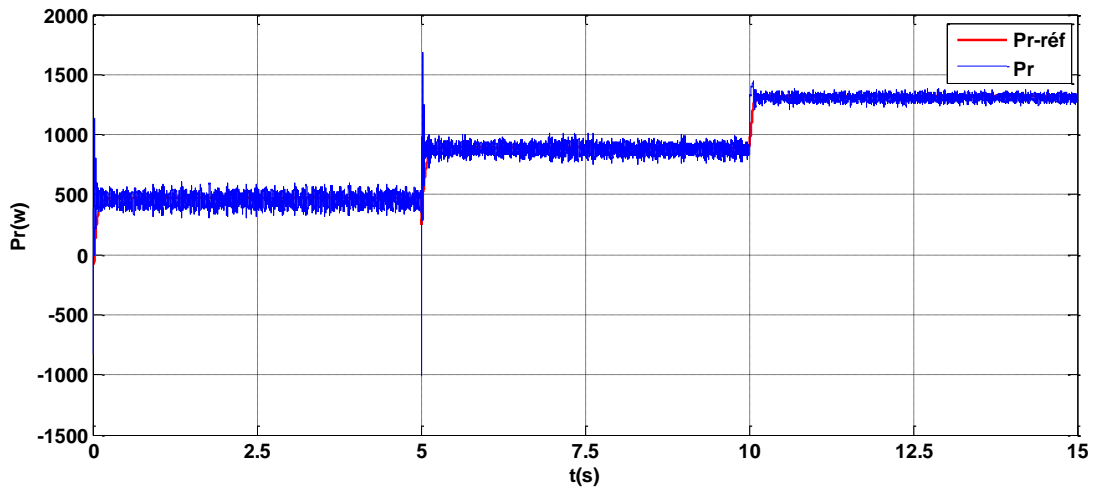


Figure II.46 : Variation de la puissance active injectée dans le réseau lors de la variation de la référence

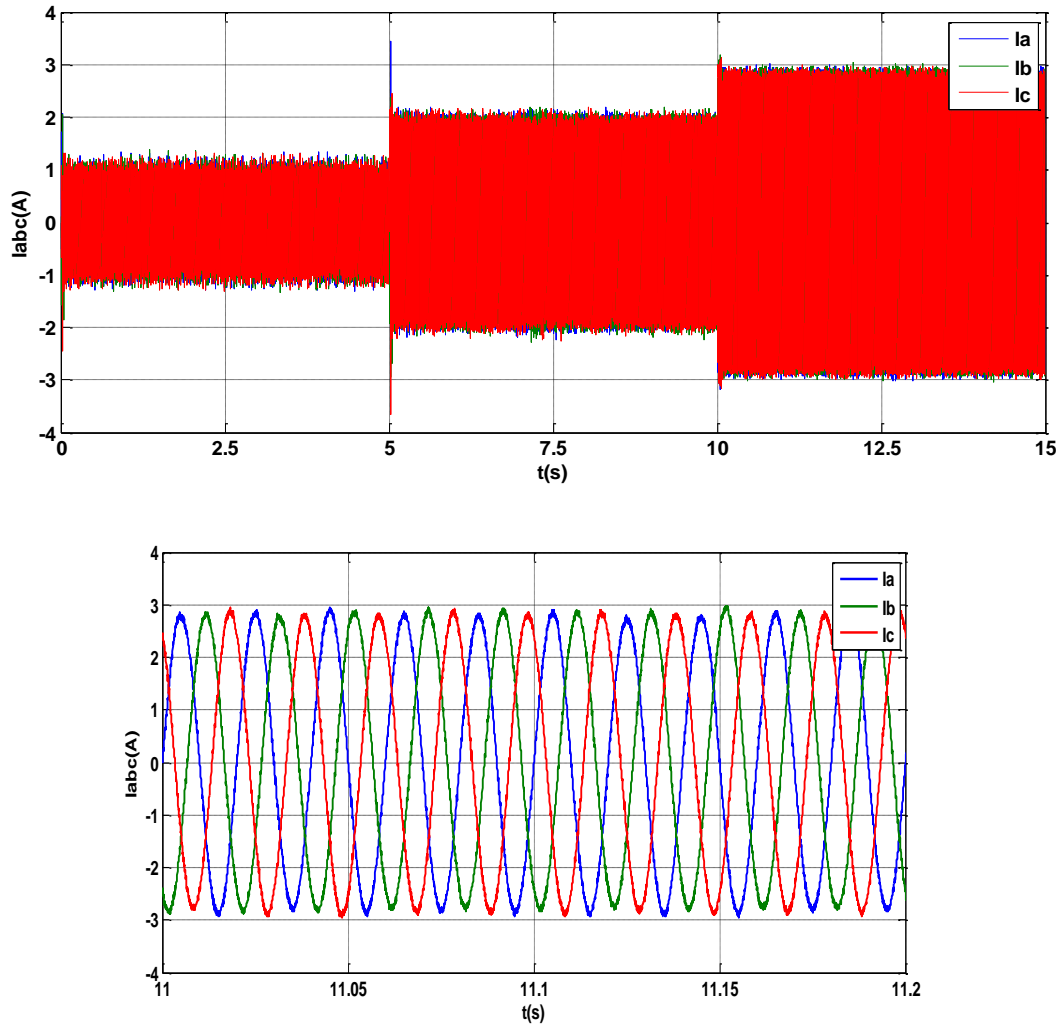


Figure II.47 : Variation des courants i_{abc} injectés dans le réseau lors de la variation de la référence

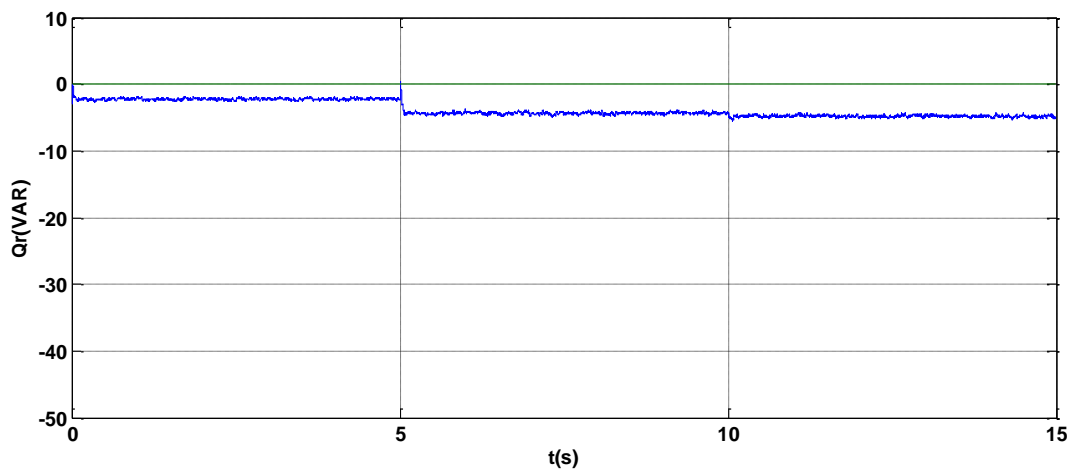


Figure II.48 : Variation de la puissance réactive injectée dans le réseau lors de la variation de la référence

Les puissances active et réactive injectées au réseau sont décrites par les figures ci-dessous, figure (II.44), figure (II.45), figure (II.46) et figure (II.48), la puissance réactive oscille autour de sa référence $Q_{\text{réf}} = 0 \text{Var}$, elle est d'une valeur moyenne presque nulle. Tandis que la puissance active est superposée à sa référence, elle est parfois positive (fonctionnement générateur de la machine, phase d'injection au réseau) et d'autre part négative (fonctionnement moteur de la machine en absorbant de l'énergie du réseau pendant une courte durée transitoire), donc les résultats sont acceptables.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la machine synchrone à aimants permanents, les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur), de plus nous avons validé notre modèle en le reproduisant sous MATLAB. On a présenté la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent pilotée à l'aide d'une "MPPT", dont les stratégies de commandes seront évoquées dans le prochain chapitre. Enfin, nous avons pu injecter la puissance électrique, extraite au réseau via un onduleur de tension triphasé, en régulant la tension du bus continu.

Chapitre III

*Architectures et
méthodes de recherche du
point maximum de
puissance*

III .1. Introduction

La courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un bon prélèvement énergétique « au gré du vent » : on parle ainsi de maximisation de la puissance, voire de MPPT (Maximum Power Point Tracking). La nécessité de ce type d'optimisation énergétique est d'autant plus significative qu'on utilise une voilure à axe vertical. En effet, la caractéristique en forme de cloche est nettement plus marquée que pour une turbine tri pale classique, ce qui sensibilise le prélèvement énergétique en fonction de la charge opposée par la génératrice sur l'arbre mécanique

C'est pour l'ensemble de ces raisons qu'une part importante de notre étude s'est focalisée sur les architectures et les méthodes de recherche du point maximal de puissance. Cette étude fait l'objet de ce chapitre qui présente, les techniques de prélèvement énergétiques [6]. Parmi ces dernières, il y a deux approches possibles :

La première, la moins classique, considère que la caractéristique $C_p(\lambda)$ n'est pas connue. Un algorithme de recherche extrême « Tracking » doit être mis en œuvre. A noter, pour cette classe de méthode d'optimisation énergétique, que l'on retrouve certaines caractéristiques des systèmes MPPT rencontrés en photovoltaïque.

La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge Figure(III.1), pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

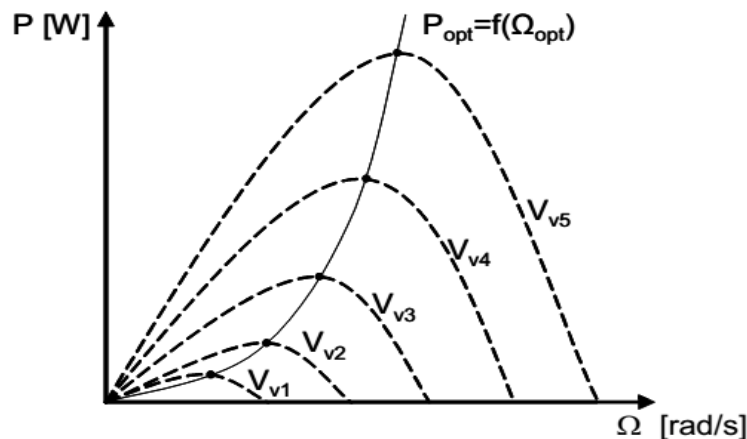


Figure III.1 : Caractéristiques de voilure dans le plan puissance – vitesse

III.2. Maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

III.2.1. Principe des techniques P&O « Perturb and Observe »

En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des règles de comportement à tenir afin de converger vers le point optimal sont relativement simples à établir. Ces règles dépendent des variations de puissance ΔP et de vitesse $\Delta \Omega$. Par exemple : « si je mesure une augmentation de puissance ($\Delta P > 0$) suite à un incrément positif de vitesse, je dois continuer à accélérer la voilure ($\Delta \Omega_{ref} > 0$). On se situe alors sur la partie gauche de la cloche $P(\Omega)$.

$$\Delta P = P[K] - P[K - 1] \quad (III.1)$$

$$\Delta \Omega = \Omega[K] - \Omega[K - 1] \quad (III.2)$$

$$\Omega_{ref}[K] = \Omega[K - 1] + \Delta \Omega_{ref}[K] \quad (III.3)$$

La Figure (III.2) donne un exemple d'une recherche dans le plan puissance – vitesse de rotation, pour une vitesse du vent donnée et constante.

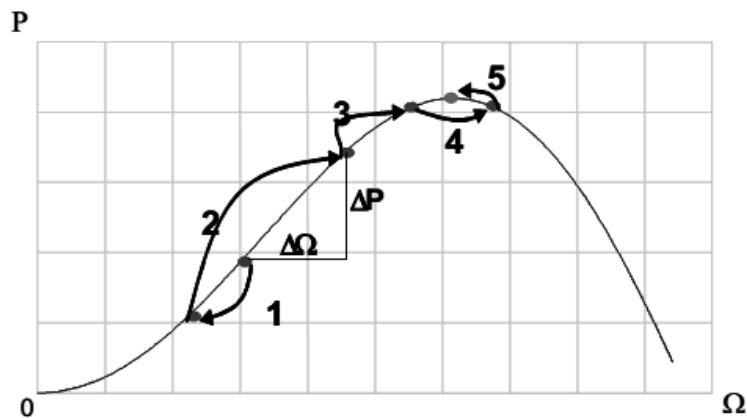


Figure III.2 : Principe de fonctionnement de MPPT à vitesse de vent constante [17].

Exemple de règles : Si $\Delta P > 0$ et $\Delta \Omega > 0$ alors $\Delta \Omega_{ref} > 0$

Si $\Delta P < 0$ et $\Delta \Omega > 0$ alors $\Delta \Omega_{ref} < 0$

Ainsi, le changement de ΔP résultant de la variation de la vitesse de rotation est soit dans le sens positif soit dans le sens négatif. La valeur de ΔP peut aussi être petite où au contraire grande. A partir de ce jugement la valeur de la consigne de vitesse est augmentée ou diminuée de façon petite ou respectivement grande dans le sens qui permet d'augmenter la puissance.

Cette commande permet la recherche du point optimum en se basant sur les observations de l'expert. Dans le cas d'un changement de la vitesse du vent, la recherche du point maximal de puissance s'effectue de la manière présentée sur la Figure (III.3), on constate que le même type de règles s'applique.

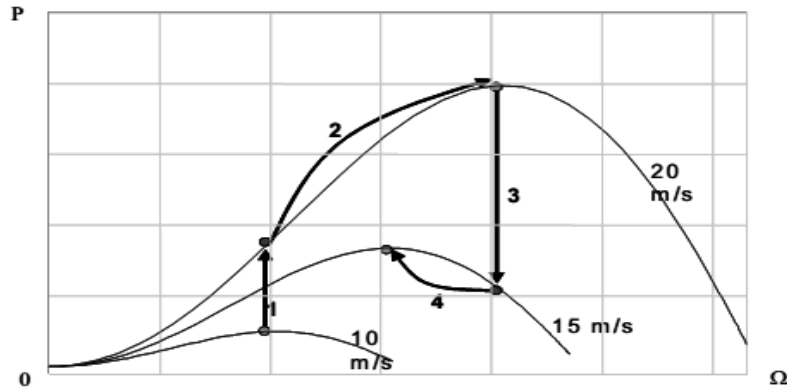


Figure III.3 : Principe de fonctionnement de MPPT à vitesse de vent non constante [17].

La Figure (III.4) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. Le modèle Simulink est donné par la Figure (III.5).

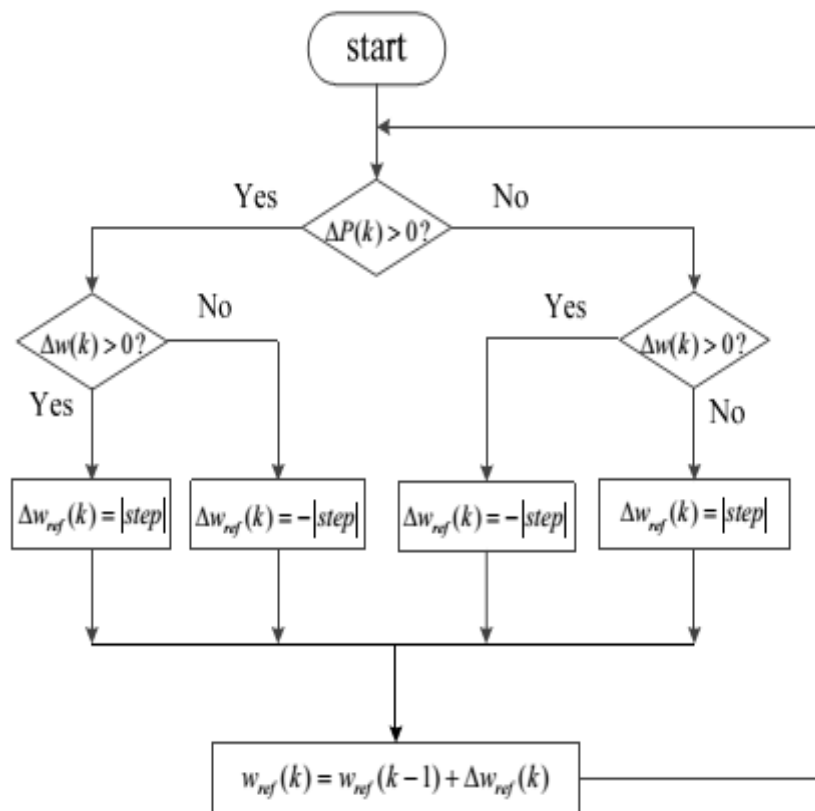


Figure III.4 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)[17]

et la valeur la vitesse. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque $\frac{dP}{dW}$ est forcé à zéro par la commande.

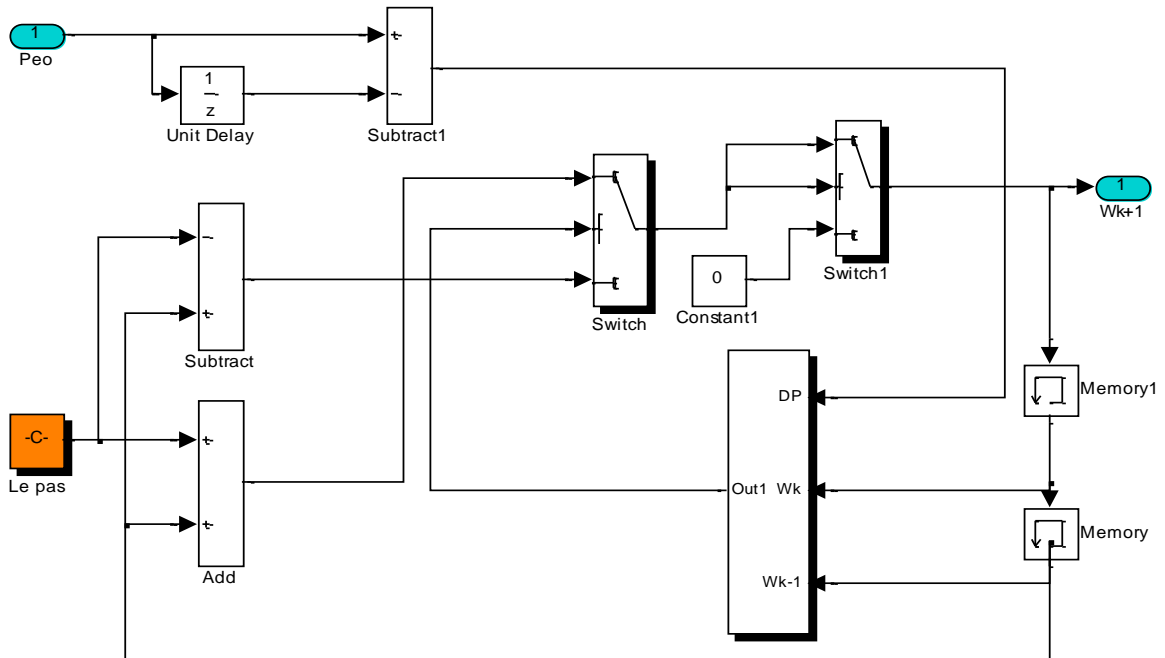


Figure III.7 : Modèle de simulation de l'MPPT par la technique de hill_climbing

Interprétation des résultats

L'utilisation de ces techniques dépend essentiellement du bon choix du pas « C », donc les résultats obtenus sont acceptables mais nécessite encore un réglage plus précis du pas.

III.2.3. MPPT par la logique floue

La logique floue est un processus de raisonnement imitant le comportement intuitif d'un opérateur humain. Elle se base sur les règles de la logique classique sans utiliser de représentations binaires. L'utilisation d'un contrôleur flou n'est envisageable que s'il existe un savoir-faire humain retranscriptible sous formes de règles floues. Les règles floues sont donc inutiles si l'on ne connaît pas parfaitement le fonctionnement du système que l'on veut commander ou si l'on est incapable de le piloter manuellement. Une règle floue comporte trois étapes fonctionnelles résumées par la figure (III.8) [24] [25] [26]:

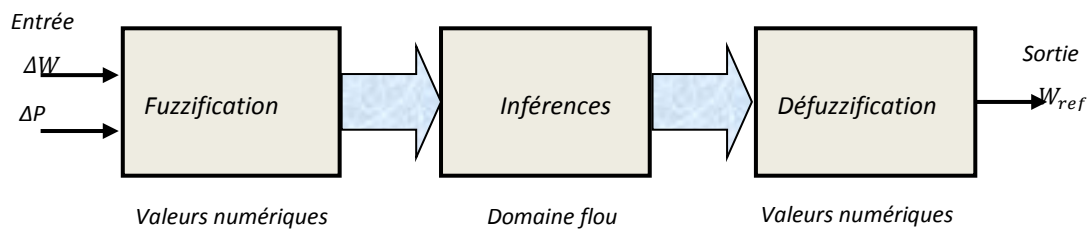


Figure III.8 : Structure de base du contrôleur MPPT flou.

La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle. Chaque élément flou appartient graduellement aux fonctions d'appartenances (ensembles flous) qui ont été définis à priori. Plusieurs fonctions d'appartenance peuvent être définies sur la même variable : dans le cas de la Figure (III.8), la variable ΔP appartient toujours à deux fonctions d'appartenance. Les fonctions d'appartenances peuvent prendre n'importe quelle forme, dans notre cas elles sont triangulaires, principalement pour des raisons de simplification des calculs. Les fonctions d'appartenance de la variable ΔP sont:

GN : Grand Négatif

MN : Moyen Négatif

PN : Petit Négatif

ZE : Zéro

GP : Grand Positif

MP : Moyen Positif

PP : Petit Positif

III.2.3.1 Interface de fuzzification

Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Etablit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées ;
- Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle $[-1, 1]$ afin de faciliter le calcul.

Dans l'exemple de la Figure (III.9), la variable d'entrée (ΔP) est égale à 12 (dans le domaine réel) :

Le degré d'appartenance de la fonction d'appartenance PP est donc de 0.6 (PPP=0.6)- le degré d'appartenance de la fonction d'appartenance MP est de 0.4 (PMP=0.4). Les degrés d'appartenance des autres fonctions d'appartenance sont nuls. On peut également dire que la proposition « la variation de puissance est petite et positive » est vraie à 60% et que la proposition « la variation de puissance est moyenne et positive » est vraie à 40%. La fuzzification de la seconde variable d'entrée mesurée, $\Delta\Omega[k-1]$, se fait de la même manière.[27] [28] [29] [30]

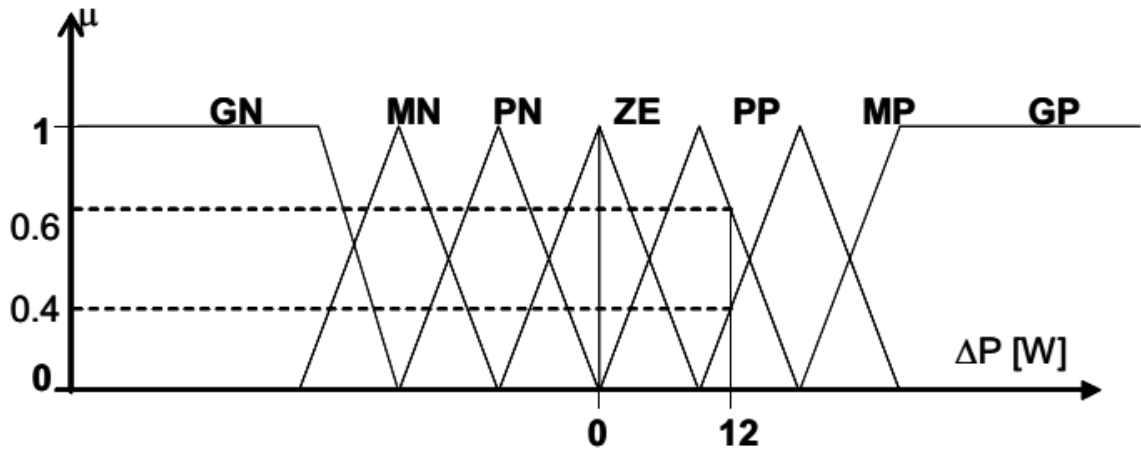


Figure III.9 : Fonction d'appartenance de l'entrée ΔP

Dans notre cas les fonctions d'appartenances des entrées ΔP et ΔW sont décrites dans les figures (III.10-III.11).

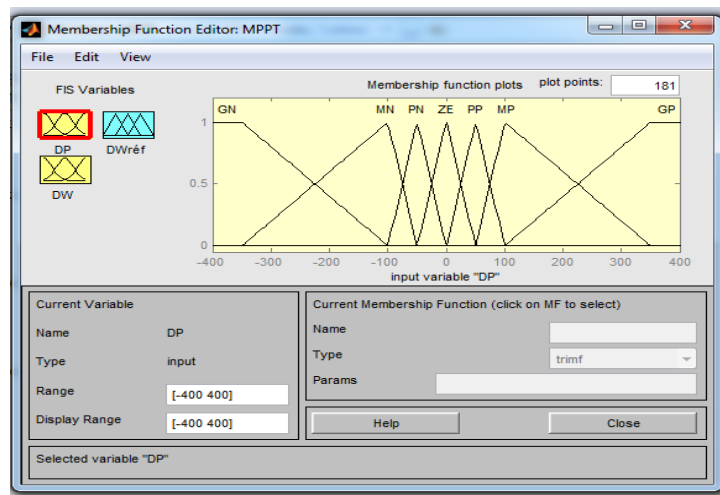


Figure III.10 : Fonction d'appartenance de l'entrée ΔP pour le régulateur MPPT

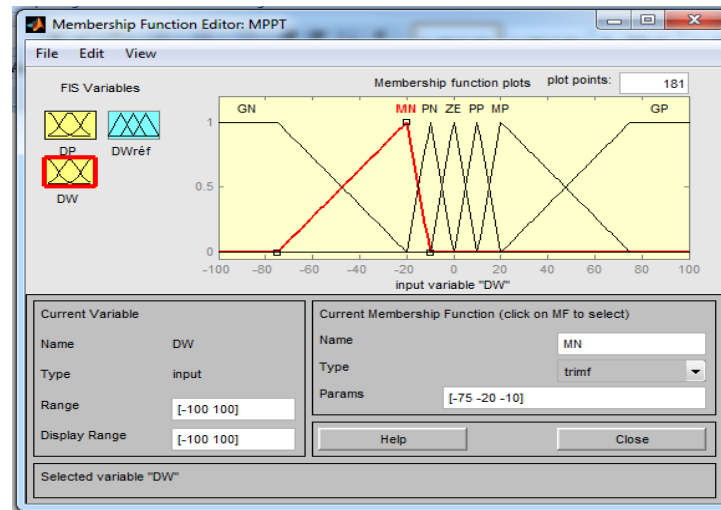


Figure III.11 : Fonction d'appartenance de l'entrée ΔW pour le régulateur MPPT

III.2.3.2. Inférence floue

Le bloc inférence est le cœur d'un RLF, il possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement:

- ✚ la méthode d'inférence max-min ;
- ✚ la méthode d'inférence max-produit ;
- ✚ et la méthode d'inférence somme-produit.

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs flous.

Donc la fuzzification des variables d'entrée effectuée est suivi par l'inférence qui consiste à déterminer les degrés d'appartenance des fonctions d'appartenances de sortie à l'aide d'un tableau d'inférence (Tableau III-1). Ce tableau résume l'ensemble des règles de savoir-faire humain, basées sur l'expérience, il traduit les règles exprimées par le langage courant suivantes :

- Si une grande augmentation de la vitesse entraîne une grande augmentation de la puissance, on continue d'augmenter fortement la vitesse de rotation
- Si une grande augmentation de la vitesse entraîne une grande diminution de la puissance, on diminue fortement la vitesse de rotation pour obtenir une augmentation rapide de la puissance

- Si une grande augmentation de la vitesse entraîne une faible augmentation de la puissance (on est alors proche de la vitesse de rotation optimale) on augmente moyennement la vitesse de rotation (début de la stabilisation)
- Si une petite diminution de la vitesse entraîne une augmentation moyenne de la puissance (on est alors loin de la vitesse de rotation optimale), on diminue moyennement la vitesse de rotation de tel sorte à se rapprocher plus rapidement du sommet de la cloche
- Si une augmentation ou une diminution quelconque entraîne une variation nulle de la puissance, on ne fait pas varier la vitesse de rotation (de tel sorte à pouvoir stabiliser le point de fonctionnement sur le sommet de la cloche)
- Si une variation nulle de la vitesse de rotation entraîne une augmentation de la puissance, on en déduit que la vitesse du vent a augmentée, il faut donc augmenter la vitesse de rotation pour se rapprocher de la nouvelle vitesse optimale
- Si une variation nulle de la vitesse de rotation entraîne une diminution de la puissance, on en déduit que la vitesse du vent a diminué, il faut donc diminuer la vitesse de rotation pour se rapprocher de la nouvelle vitesse optimale

Remarque : La ligne centrale ($\Delta\Omega[k-1]=ZE$), qui permet de prendre en compte le fait qu'une variation de la puissance puisse être due à une modification de la vitesse du vent plutôt qu'à une variation de la vitesse de rotation, brise la symétrie axiale horizontale du tableau d'inférence.

ΔP $\Delta\Omega_{(k-1)}$	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
GN	GP	GP	MP	ZE	MN	GN	GN
MN	GP	MP	PP	ZE	PN	MN	GN
PN	MP	PP	PP	ZE	PN	PN	MN
ZE	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
PP	MN	PN	PN	ZE	PP	PP	MP
MP	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
GP	GN	GN	MN	ZE	MP	GP	GP

Tableau III.1 : Règles permettant de déterminer les fonctions et les degrés d'appartenance de $W_{réf}(k)$ [17].

III.2.3.3. Interface de défuzzification

La défuzzification consiste à déduire une valeur numérique précise de la sortie du régulateur (x_r) à partir de la conclusion résultante floue issue de l'opération d'inférence. Les méthodes couramment utilisées sont :

- La méthode de centre de gravité ;
- La méthode du maximum ;
- La méthode des surfaces ;
- La méthode des hauteurs.

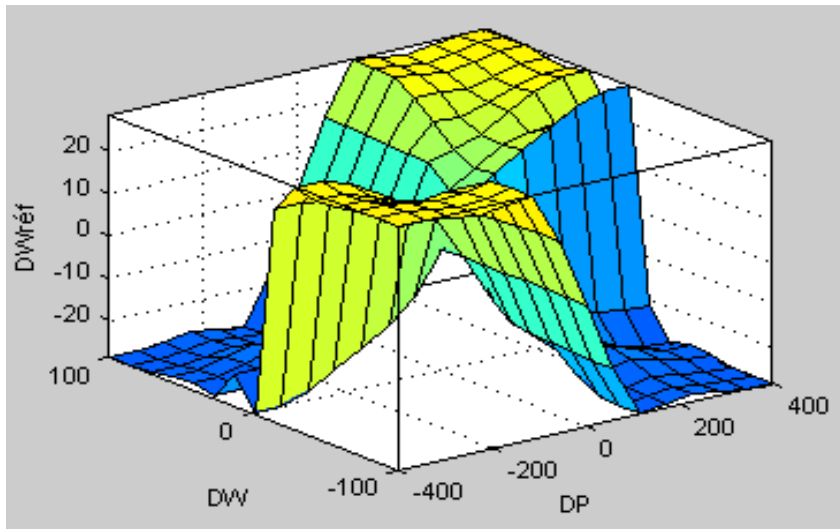


Figure III.12 : Surface représentant ΔW_{ref} à la sortie du régulateur MPPT

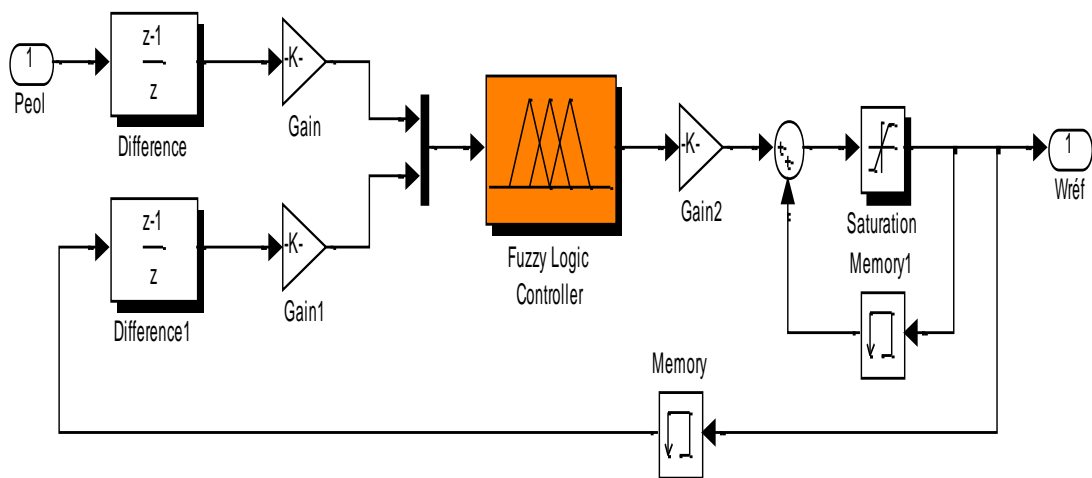


Figure III.13 : Modèle de simulation de l'MPPT FLOU.

III.2.3.4. Résultats de simulation :

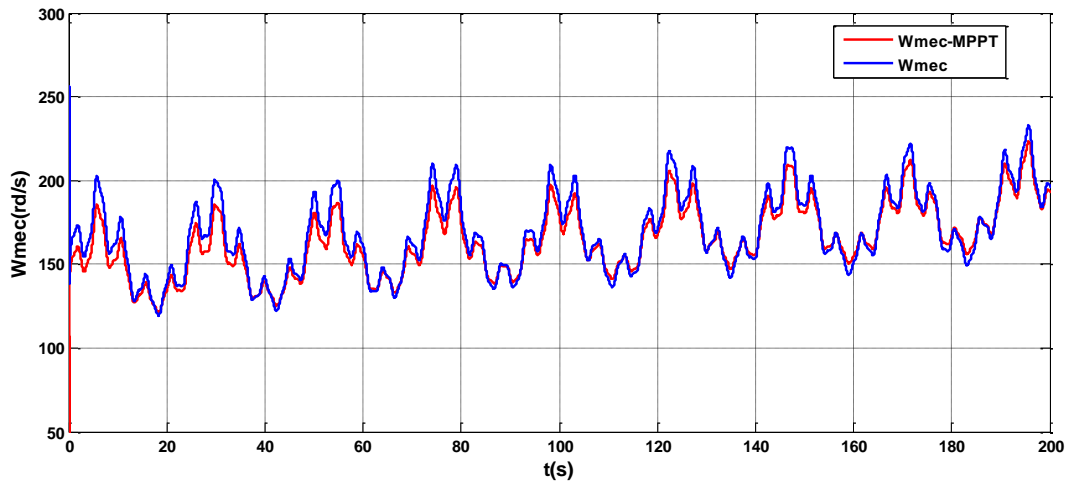


Figure III.14 : Vitesse de rotation issue de l'MPPT

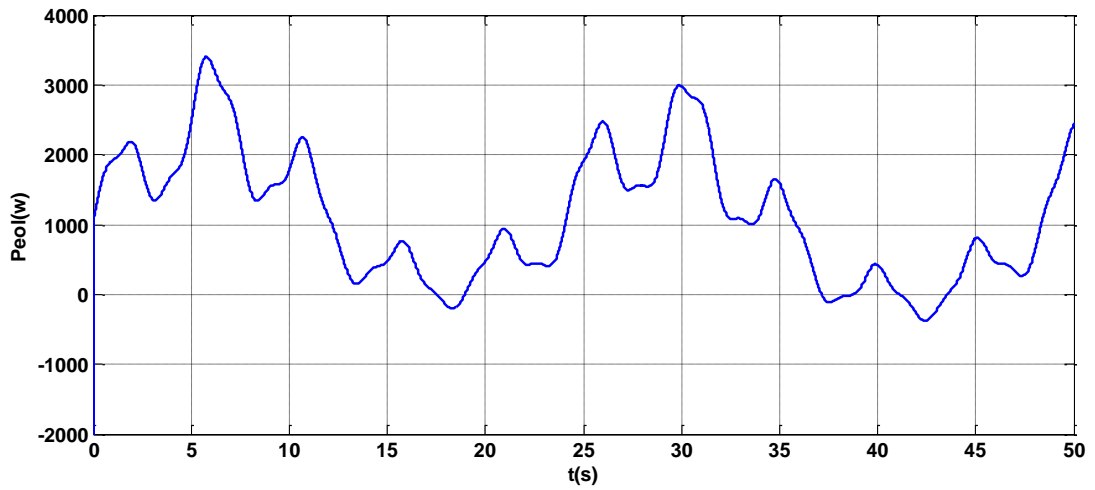


Figure III.15 : Puissance éolienne

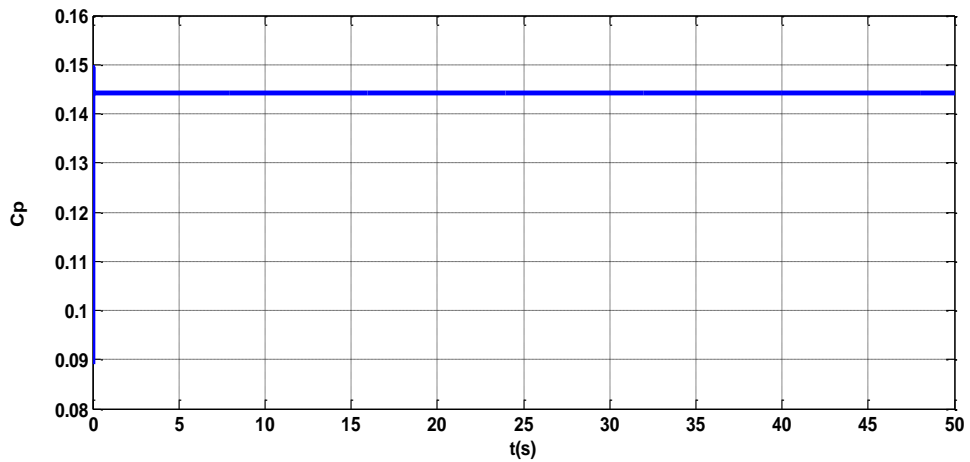


Figure III.16 : Coefficient de puissance C_p

III.2.3.5. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenues Figure (III.14), on remarque que la vitesse mécanique issue de l'MPPT suit parfaitement la vitesse optimale avec une erreur admissible et un coefficient de puissance constant Figure (III.16) ce qui montre l'efficacité d'utilisation de l'intelligence artificielle dans ce type de commande.

III.3. Maximisation de puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

III.3.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Afin d'extraire un maximum de puissance malgré les variations fréquentes de la vitesse du vent, une commande par l'asservissement de la vitesse de rotation permet de maintenir le rapport entre la puissance extraite et celle du vent à sa valeur maximale. En d'autres termes maintenir le coefficient de puissance C_p à sa valeur maximale. 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- $C_{pmax} = 0.15$: c'est le coefficient de puissance maximum.
- 2- $\lambda_{opt} = 0.78$: c'est la vitesse relative maximale.
- 3- Le schéma de simulation doit permettre de commander la vitesse de rotation de sorte à maintenir les valeurs maximales de C_p et λ quelque soit la vitesse du vent.

Pour cela on peut utiliser un contrôleur de vitesse (régulateur PI).

Le schéma bloc de la figure (III.17) illustre la commande de la vitesse à facteur de puissance maximum, basé sur les équations (II.14) et (II.15).

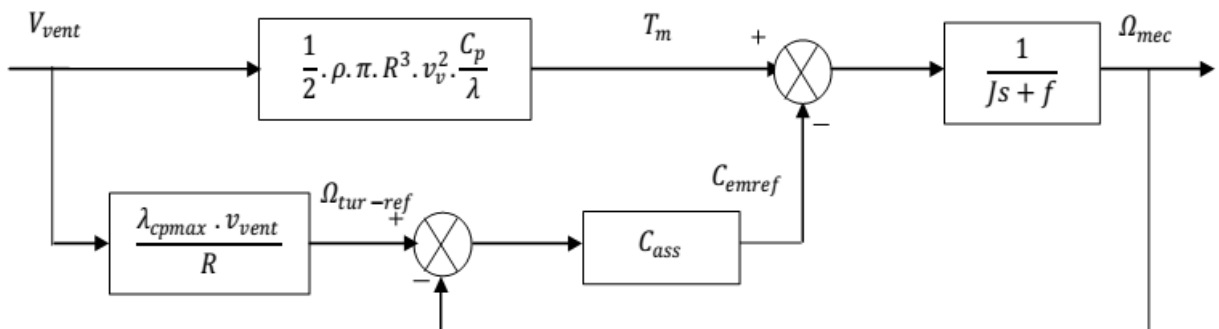


Figure III.17 : Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse [15]

Le vent étant la source principale d'énergie pour le fonctionnement du système, il fournit le couple aérodynamique C_{eol} dont on soustrait le couple électromagnétique créé dans la génératrice on obtient le couple mécanique qui permet de calculer la vitesse de rotation. Mais pour commander cette dernière on calcule la vitesse qui correspond à C_{pmax} . Ensuite on génère le couple électromagnétique de référence en se servant d'un contrôleur. [15][28]

III.3.1.1. Détermination de la vitesse de référence

La commande de la vitesse de rotation de la turbine nécessite d'imposer une vitesse de rotation de référence, c'est-à-dire $C_p = 0.15$ et $\lambda_{opt} = 0.78$.

La vitesse de rotation de référence est donnée par :

$$\Omega_{max} = \frac{\lambda_{max} V_v}{R} \quad (III.4)$$

III.3.1.2. Calcul des paramètres du régulateur de vitesse PI

Considérons le schéma de commande donné par la figure (III.16) Le couple électromagnétique de référence est obtenu grâce à l'action d'un contrôleur de type PI sur la différence entre la vitesse de référence et la vitesse de rotation.

La fonction de transfert qui décrit cette action est donnée par :

$$C_{em-ref}(s) = \left(K_i + \frac{K_p}{s} \right) \cdot (\Omega_{tur-ref}(s) - \Omega_{mec}(s)) \quad (III.5)$$

K_i : Le gain intégral

K_p : Le gain proportionnel

Si on isole la partie du schéma de commande qui concerne la boucle de régulation de la vitesse on obtient le schéma de la figure (III.18).

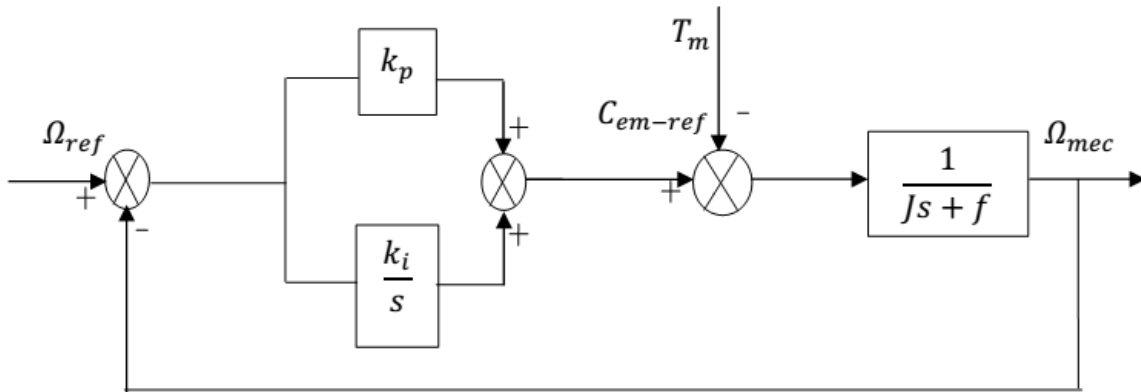


Figure III.18 : Schéma bloc de l'asservissement en utilisant un régulateur PI

Comme le système à étudier est linéaire on peut écrire, en vertu du théorème de superposition, la fonction de transfert sous la forme suivante :

$$\Omega_{mec}(s) = F(s) \cdot \Omega_{réf}(s) - P(s) \cdot T_m(s) \quad (\text{III.6})$$

$$F(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{Js^2 + (f + K_p)s + K_i} \quad (\text{III.7})$$

$$P(s) = \frac{s}{Js^2 + (f + K_p)s + K_i} \quad (\text{III.8})$$

Au régime permanent l'erreur statique due à la perturbation externe en l'occurrence le couple aérodynamique est nulle grâce à la fonction intégrale du régulateur.

La fonction de transfert s'écrira alors comme ceci :

$$\Omega_{mec} = F(s) \cdot \Omega_{réf} \quad (\text{III.9})$$

Le choix d'une pulsation propre et d'un facteur d'amortissement ξ permettent de calculer les coefficients du régulateur PI. [15] [28]

$$K_i = \omega_n^2 \cdot J \quad (\text{III.10})$$

$$K_p = 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \cdot J - f \quad (\text{III.12})$$

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté quelques méthodes de calcul de l'MPPT, et comme technique de commande avantageuse, la commande floue avec sa possibilité de contrôler des systèmes complexes sans nécessité de leur modélisation complète, était l'objet traité par ce troisième chapitre, où on a donné la description du contrôleur flou, afin de régler la vitesse du système éolien étudié à sa valeur optimale assurant la MPPT. Cette application est simulée numériquement en utilisant l'outil MATLAB,

mais le dimensionnement du régulateur flou est fait par ajustement manuel en utilisant la méthode « essai-erreur », pour déterminer les trois gains de normalisation.

Dans le chapitre qui suit nous allons comparer et interpréter les résultats de simulation avec les résultats expérimentaux.

Chapitre IV

*Elaboration du banc
d'essai expérimental*

IV.1. Introduction

L'étude théorique de tous les systèmes de commande est une application sur Matlab Simulink. Sachons que toutes ses procédures sont virtuelles, alors en 2001, un innovateur et le fournisseur leader ont mis sur le marché des outils de développement et de tests des systèmes mécatroniques asservis, offre un support technique optimal qu'on appelle dSPACE. Ce dernier, a pour tâche de faire des essais expérimentaux.

Les principaux outils MathWorks® et dSPACE sont des outils de modélisation, d'analyse, de simulation de système en temps réels. Avec un tel outil, on s'approche beaucoup plus de la réalité.

Nous allons présenter dans ce chapitre l'outil dSPACE, les résultats de simulations et expérimentaux des différentes techniques de commande. Ainsi, nous ferons une interprétation et une comparaison des résultats.

IV.2. Présentation du Banc d'essai

Pour la mise en œuvre expérimentale de lois de commande, un banc d'essais a été conçu au laboratoire LSPIE à l'université de Batna en utilisant le matériel mis à notre disposition. Le banc d'essais, dont la photo est représentée par la figure (IV.1), est constitué des parties essentielles suivantes :

IV.2.1. Partie puissance

- ❖ Une machine Synchrones d'une puissance de 1 kW , dont les caractéristiques sont données en annexe 1.
- ❖ Le convertisseur statique alimentant la machine est un onduleur de tension, SEMIKRON, 4 kW , à base de composants de haute fréquence de découpage (transistors IGBT).
- ❖ La machine synchrone est accouplée à une machine à courant continu .

- ❖ Un autotransformateur (0-450V entre phases) permet d'ajuster le niveau de tension sur le bus continu en sortie du pont redresseur à diodes. La commande des bras de pont est réalisée par modulation de largeur d'impulsion (SV- PWM), dont la fréquence de découpage choisie est de 3 kHz.

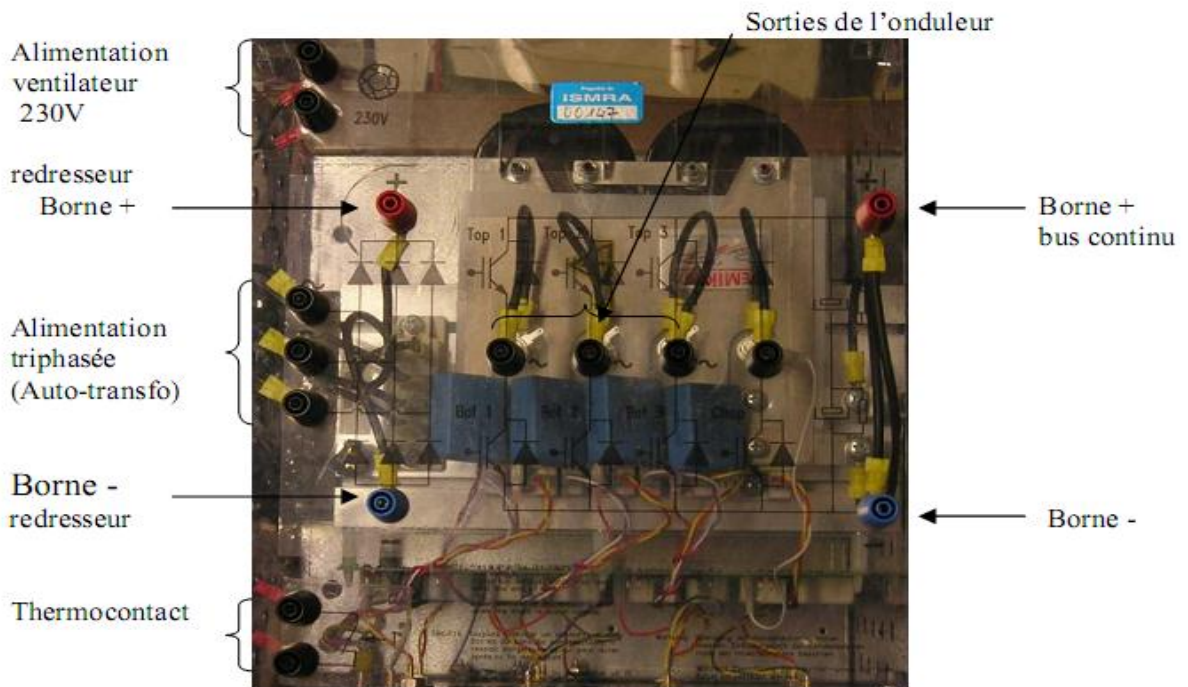


Figure IV.1 : Photo montrant une vue de dessus du convertisseur SEMIKRON

IV.2.2. Partie commande

❖ La partie commande est fondée sur la carte dSPACE® DS1103 qui possède son propre processeur : le Motorola PowerPC 604 e – 400/333 Mhz, permettant de gérer l'application, et un DSP : le TMS320F240 de Texas Instruments spécialement conçu pour le contrôle des convertisseurs statiques de puissance en générant les signaux de commande MLI en logique TTL. La carte DS1103 est implantée dans un PC qui sert d'interface Homme-Machine et constitue la partie "hardware" de dSPACE®. La partie "software" se compose, quant à elle, de deux logiciels. Le premier, Matlab/Simulink®, permet une programmation aisée de l'application temps réel sous Simulink par utilisation de blocs spécifiques (appartenant à la "Real Time Interface (RTI) toolbox", permettant de configurer les entrées/sorties de la carte DS1103. Le second logiciel, ControlDesk, possède une GUI interactive, qui permet l'acquisition de données et la modification en temps réel des structures et/ou des paramètres de l'algorithme. Le Real-Time Workshop de Matlab est capable de générer automatiquement un fichier objet à partir du modèle Simulink. Ce

fichier est ensuite implanté dans la mémoire de la carte DS1103. Celle-ci reçoit du processus à commander, les informations nécessaires et fournit les signaux de pilotage de l'onduleur.

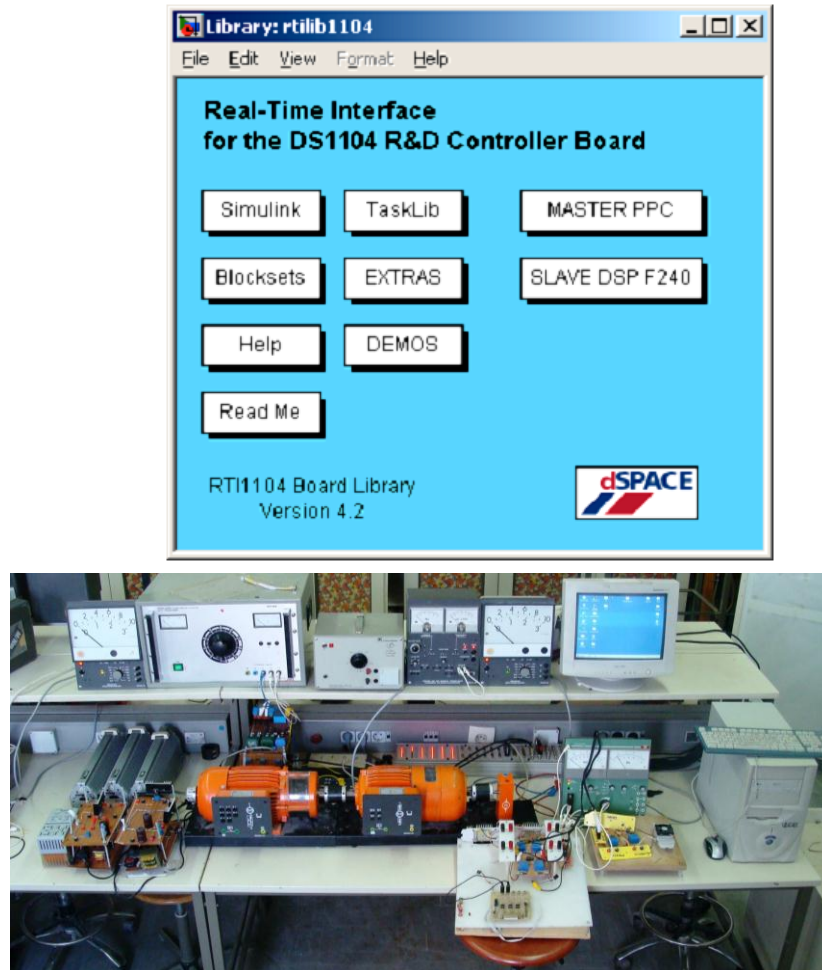


Figure IV.2 : Photo montrant les éléments essentiels constituant le banc d'essais

IV.2.3. Partie mesures

L'échange d'informations entre les deux parties décrites ci-dessus s'effectue par l'intermédiaire d'un boîtier externe de raccordement (CP1103), relié à la carte via un câble blindé. L'environnement de mesures comporte :

- ❖ Une carte d'acquisition associée aux capteurs de courant LEM-LA 25-NP et de tension LEM-LV 25-P à effet Hall ;

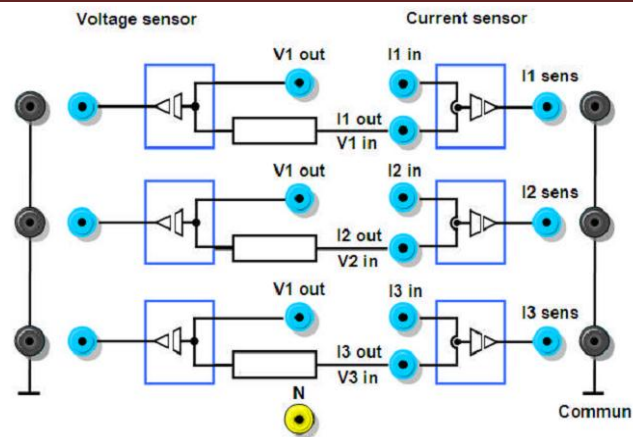


Figure IV. 3 : Carte d'acquisition associée aux capteurs de courant et de tension

- ❖ Une dynamo tachymétrique est monté sur l'axe des machines et permettant de capter la vitesse de rotation et de l'envoyer directement sur le port parallèle de la carte CP1103. Le schéma synoptique de la figure (IV.4) illustre la constitution du banc d'essais.

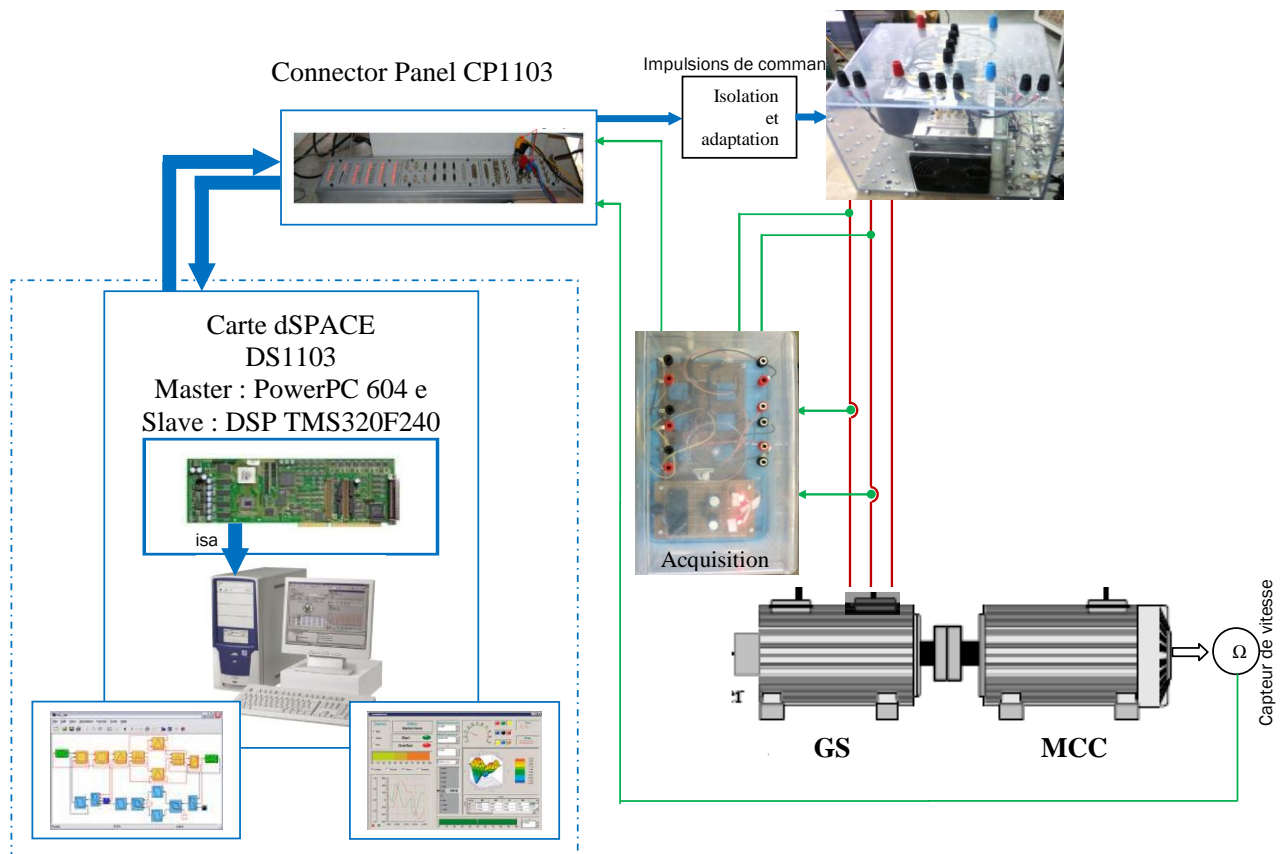


Figure IV.4 : Synoptique du banc d'essais

Les blocs Real Time Interface (RTI) pour Simulink sont insérés à la place du modèle de la machine

IV.3. Emulateur éolien :

Pour reproduire la caractéristique (Ω (vitesse angulaire), P (puissance électrique), V (vitesse du vent) d'une éolienne à vitesse variable et valider les résultats obtenus par simulation expérimentalement, on va utiliser un système nommé simulateur éolien (reproducteur de comportement d'une éolienne à vitesse variable) et qui peut être schématisé comme suit

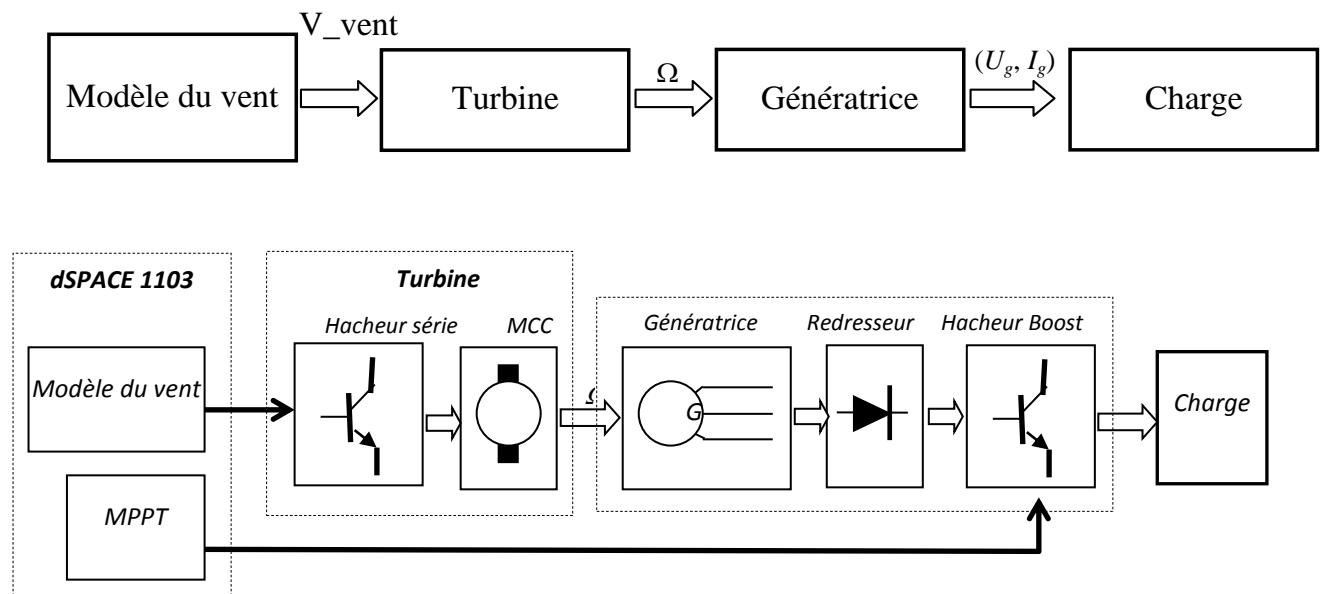


Figure IV.5 : Schémas de principe du simulateur éolien

IV.3.1. Modèle de la vitesse du vent (V (m/s)) :

Dans le but de reproduire les caractéristiques de la vitesse du vent, il existe deux possibilités qui sont les mesures expérimentales et la modélisation analytique. La première consiste à effectuer des mesures expérimentales sur un site éolien bien défini. Cette première solution est certes beaucoup plus précise que la deuxième mais seulement elle ne permet pas de simuler différents types de profil de vitesse du vent. Ceci veut dire que le profil de la vitesse du vent obtenu sera propre à un site donné et ne pourra plus être modifié si on veut obtenir un fonctionnement ne correspondant pas au profil du site considéré. La deuxième possibilité semble plus souple car il s'agit d'une modélisation analytique de la grandeur. La vitesse du vent peut être décomposée en deux composantes :

- ✓ Sur une échelle de temps comprise entre quelques fractions de secondes et quelques heures, le vent peut être considéré comme un phénomène aléatoire. Cette composante s'appelle « la composante de turbulence notée (V_t) ».
- ✓ Sur de plus longues périodes, les caractéristiques moyennes du vent dans un site donné varient régulièrement. Cette composante est dénommée « composante lente notée (V_l) ».

Parmi les méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent : la méthode qui utilise la caractéristique spectrale de Van Der Hoven. Dans ce modèle, la composante de turbulence est considérée comme un processus aléatoire stationnaire et donc elle ne dépend pas de la variation de la moyenne de la vitesse du vent. A partir de cette caractéristique spectrale de puissance, on effectue une discrétisation directe . Alors la vitesse du vent peut s'écrire comme suit :

$$V(t) = v_l(t) + v_t(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^{N_l} A_i \cos(w_i t + \varphi_i) + \frac{2}{\pi} \sum_{N_l}^N A_i \cos(w_i t + \varphi_i) \quad (4.1)$$

Tel que :

A_i : l'amplitude de chaque composante spectrale ;

w_i : la pulsation en rad/s ;

φ_i : la phase en rad.

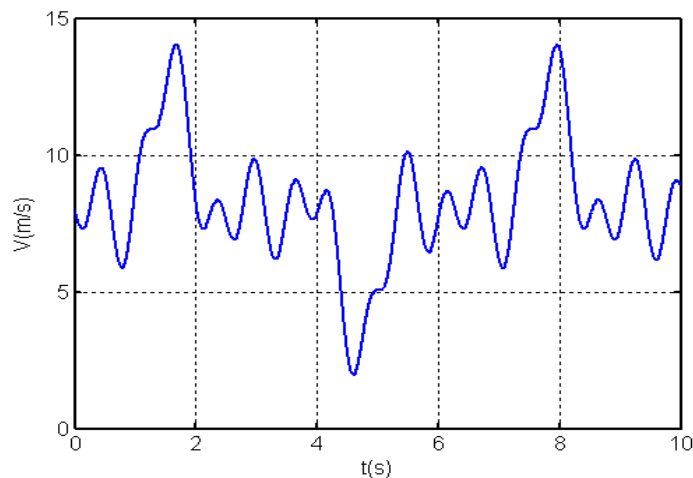


Figure IV.6 : La vitesse du vent V(m/s) en fonction du temps t(s).

IV.3.2. Modèle de la turbine :

La turbine sera remplacé par un Moteur à courant continu MCC alimenté par hacheur série. l'ensemble sera piloté par le dSPACE en contrôlant la vitesse de la MCC, Figure (IV.8).

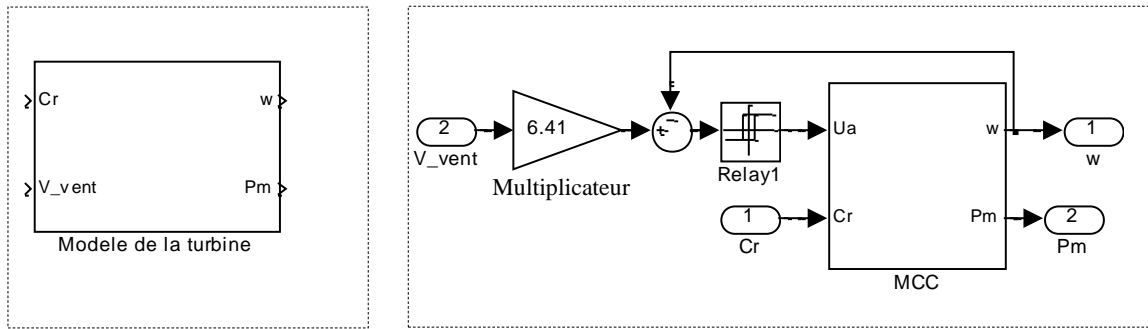


Figure IV.7 : Simulateur de la turbine

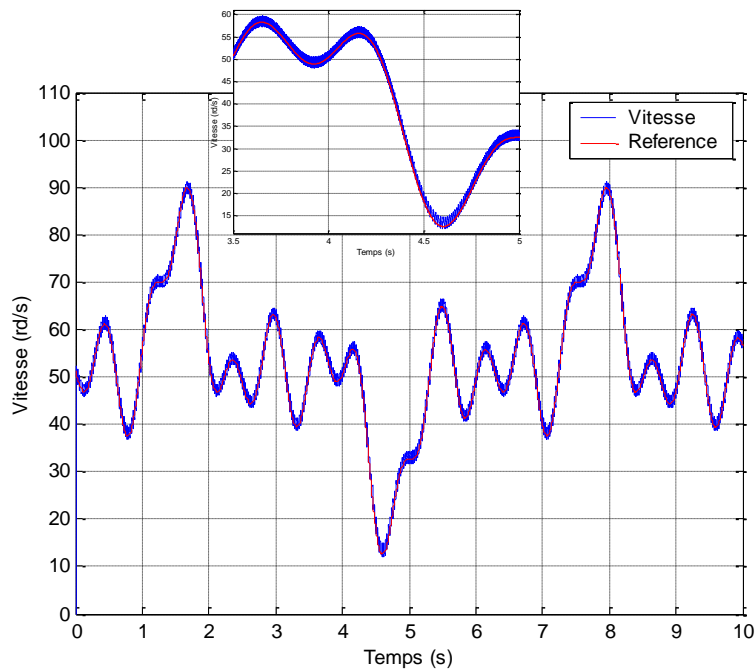


Figure IV.8 : Vitesse de la turbine et vitesse de référence en fonction du temps

IV.4. Les convertisseurs utilisés

Les convertisseurs utilisés ce sont les convertisseurs continu–continu nommés aussi hacheurs. Les hacheurs série, parallèle et série-parallèle sont des outils qui rendent la tension moyenne de sortie U_s inférieur, supérieur et égale respectivement à celle de l'entrée U_e et cela pour un rapport cyclique $\alpha = 0.5$.

IV.4.1. Essai d'un hacheur parallèle (Boost)

Avec une tension d'entrée $U_e = 30V$, rapport cyclique $\alpha = 0.5$, résistance de charge $R_{ch} = 320\Omega$, condensateur de filtrage $C_f = 250\mu F$, inductance $L = 0.0108H$ et la réalisation avec un hacheur parallèle donne les :

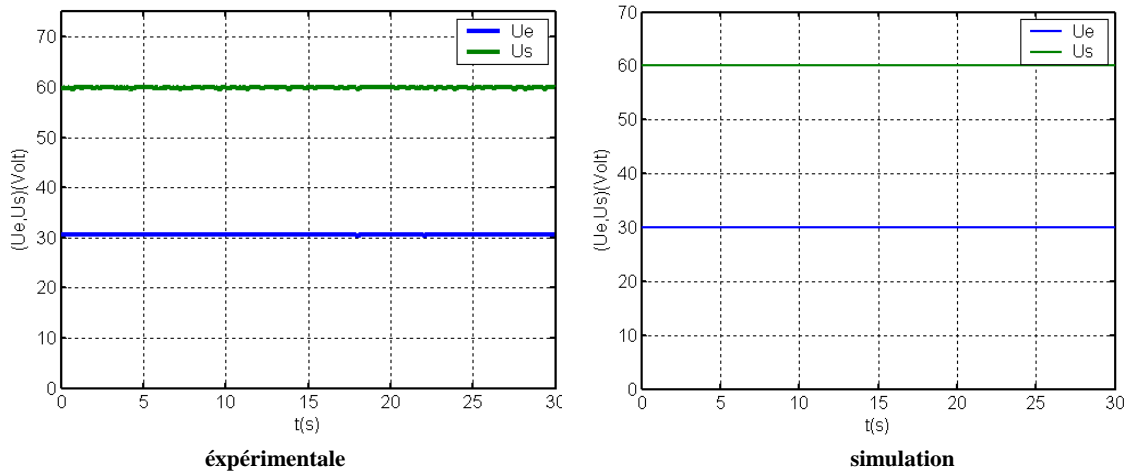


Figure IV.9 : Tension d'entrée et de sortie d'un hacheur parallèle

IV.4.2. Essai d'un hacheur série

Avec une tension d'entrée $U_e = 60V$, rapport cyclique $\alpha = 0.5$, résistance de charge $R_{ch} = 320\Omega$, condensateur de filtrage $C_f = 250\mu F$ et la réalisation de l'installation avec un hacheur série donne les résultats suivants :

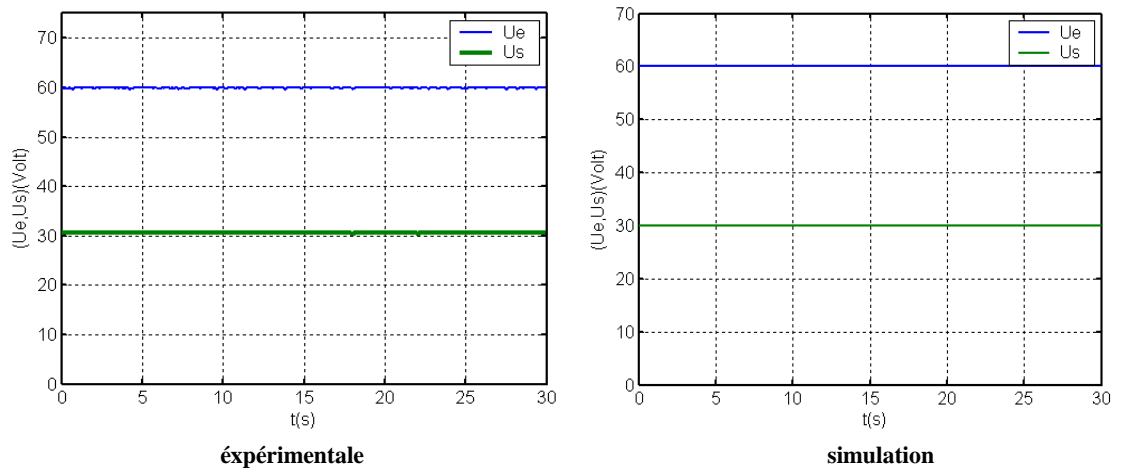


Figure IV.10 : La tension d'entrée et sortie d'un hacheur série.

IV.4.3. Essai d'un hacheur série-parallèle

Avec une tension d'entrée $U_e = 60V$, rapport cyclique $\alpha = 0.5$, résistance de charge $R_{ch} = 320\Omega$, condensateur de filtrage $C_f = 250\mu F$, inductance $L = 0.0108H$ et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (1.7), on aura le résultat suivant :

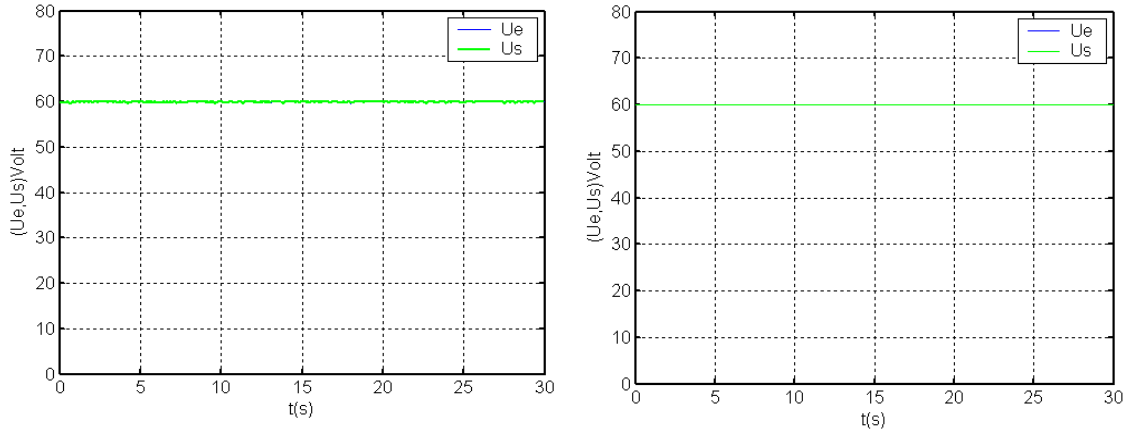


Figure IV.11 : Tension d'entrée et de sortie d'un hacheur série-parallèle

IV.5. L'MPPT

Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelque soit la puissance générée, le couple électromagnétique C_{em} développé est à tout instant égal à sa valeur de référence C_{em-ref} , la technique d'extraction du maximum de puissance utilisée ici consiste à déterminer la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La vitesse de la génératrice Ω qui égale à $\Omega_{turbine}$ (pas de multiplicateur dans notre cas) est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien C_g , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r .

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine C_{aer} de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de la vitesse est indispensable. La référence de la vitesse de la turbine est celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{Cpmax} (β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p . Alors on peut écrire :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{Cpmax} \cdot V}{R} \quad (4.2)$$

avec,

- V : la vitesse du vent ;
- R : la longueur de la pale.

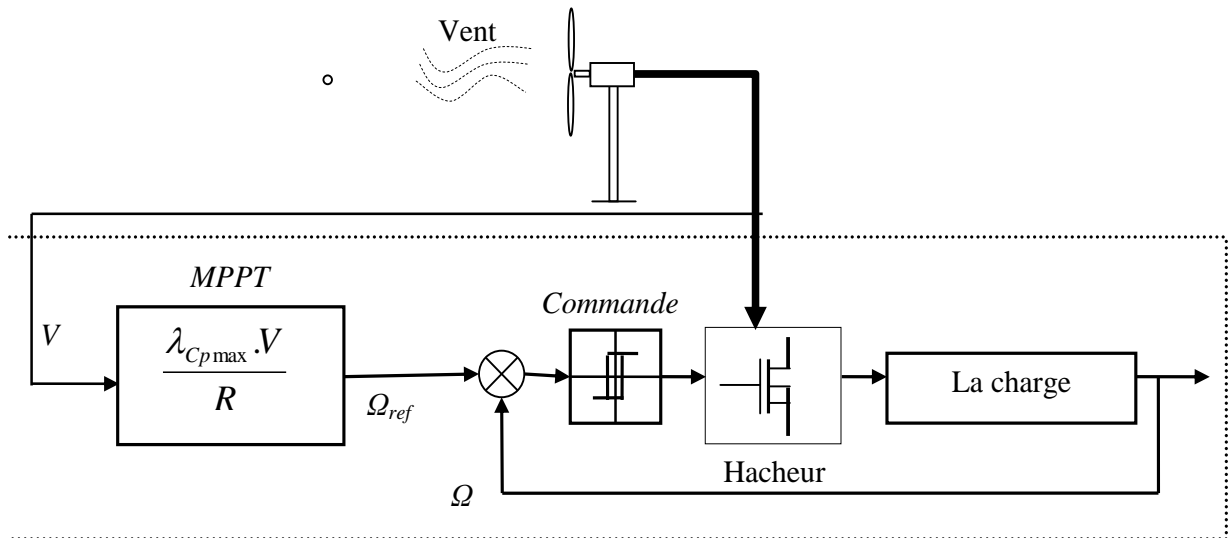


Figure IV.12 : Principe de l'MPPT proposé pour le système éolien

Avec une tension d'excitation et alimentation induit du moteur à courant continu à excitation séparée respectivement $U_{ex} = 220V$ et $E_a = 150V$, tension d'excitation de la génératrice $U_{exg} = 160V$, une charge variable, un hacheur série-parallel et la réalisation de l'installation illustrée dans la figure (IV.12), on aura le résultats expérimentaux suivants :

- a) A une vitesse du vent constante :

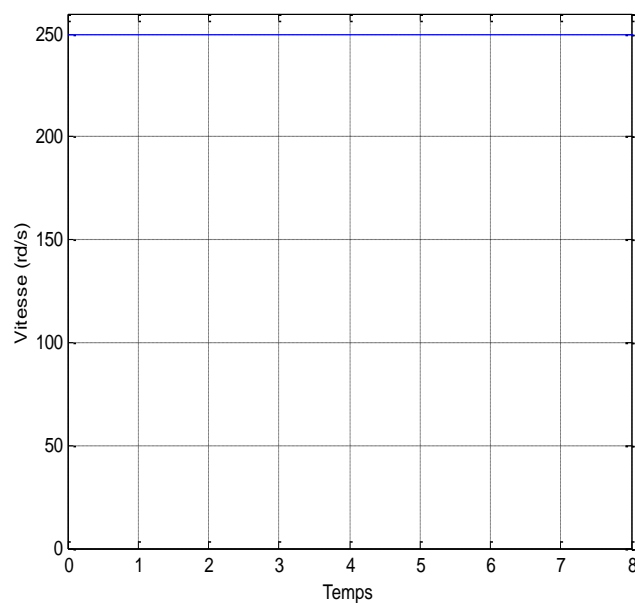


Figure IV.13 : Vitesse du vent constante pour le système éolien

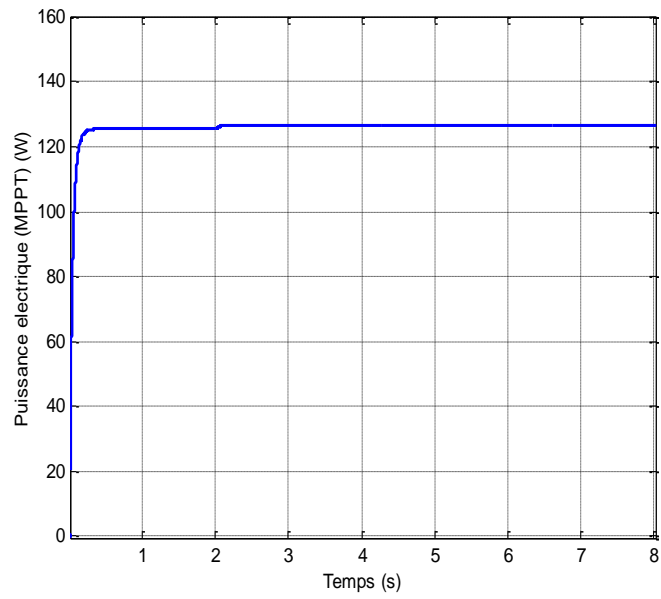


Figure IV.14 : Puissance électrique d'entrée résultante du système éolien en fonction du temps

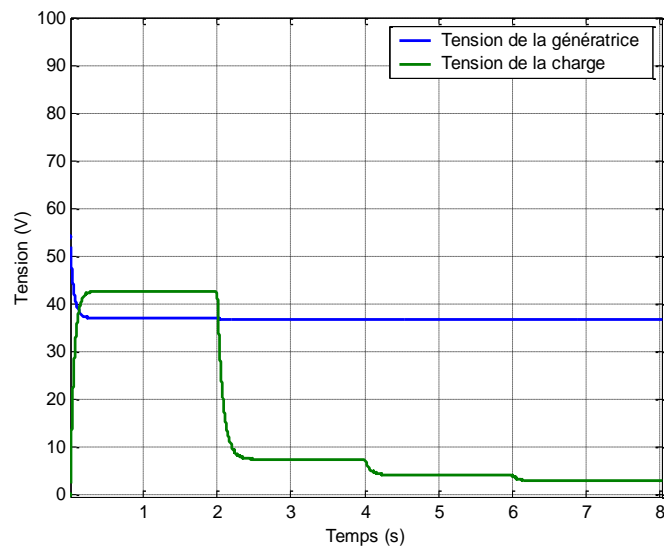


Figure IV.15 : Tensions de la génératrice et de la charge résultantes du système éolien en fonction du temps.

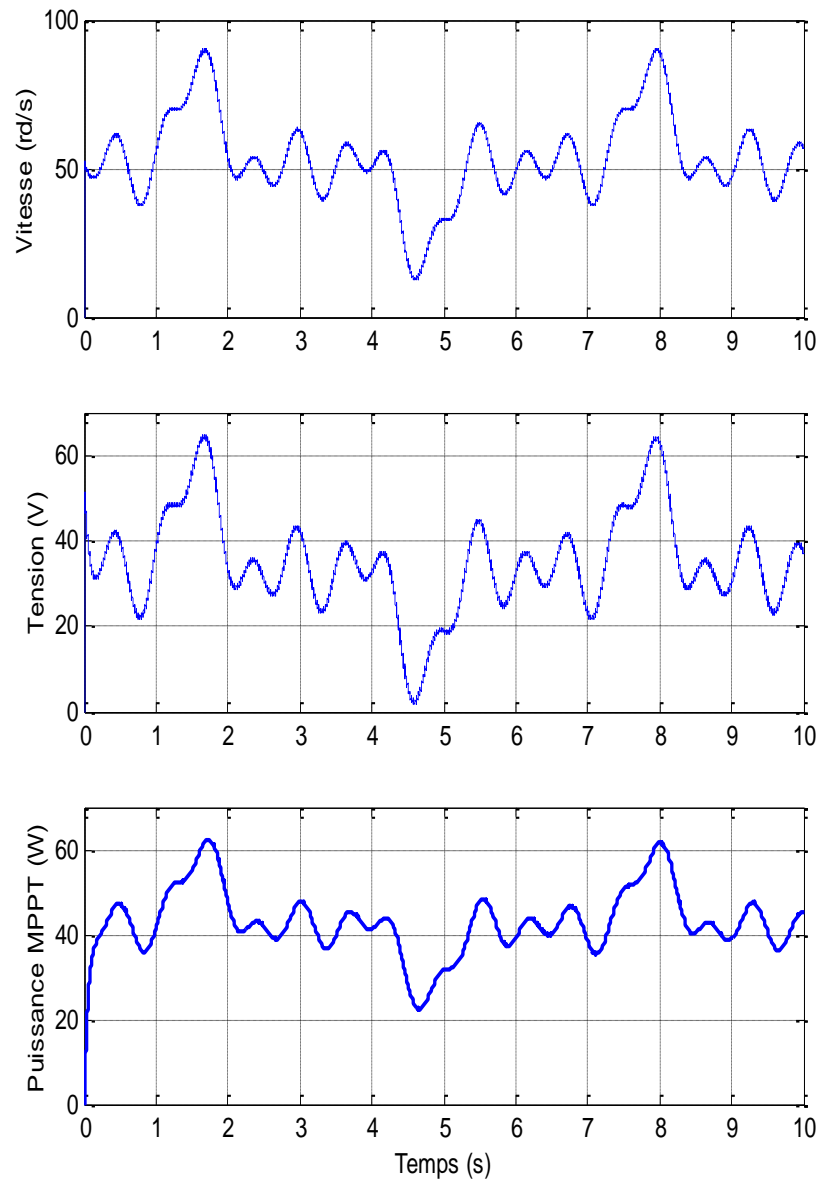


Figure IV.16 : Vitesse, tension et puissance d'un système éolien avec son Mppt en fonction du temps.

IV.6. Interprétation des résultats expérimentaux obtenus

Les différents résultats obtenus peut être interprétés comme suit :

- ✓ Dans la figure (IV.9), on remarque que l'hacheur parallèle donne le résultat attendu (pour une tension d'entrée de 30Volt, la tension de sortie est de 60Volt et cela avec un rapport cyclique $\alpha=0.5$), malgré les peu parasite qui demeure le signal de sortie (conséquence d'un filtrage moins exacte) ;

- ✓ Dans la figure (IV.11), l'hacheur série-parallèle donne le résultat attendu (pour une tension d'entrée de 60Volt, la tension de sortie est de 60Volt et cela avec un rapport cyclique $\alpha=0.5$), malgré les peu parasites qui demeure le signal de sortie (conséquence d'un filtrage moins exacte) ;
- ✓ Dans la figure (IV.10), la même chose pour l'hacheur série qui donne le résultat attendu (pour une tension d'entée de 60Volt, la tension d sortie est de 30Volt et cela avec un rapport cyclique $\alpha=0.5$), malgré les peu parasites qui demeure le signal de sortie (conséquence d'un filtrage moins exacte) ;
- ✓ La charge électrique est un ralentisseur de vitesse de la génératrice électrique car la tension est l'image de la vitesse (plus la charge inclus est grande plus le courant est grand c.à.d. mois de tension (moins de vitesse)). L'Mppt du système éolien réalise son objectif et suit la vitesse de référence avec efficacité acceptable (vitesse constante ou vitesse variable) ;

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, une mise en œuvre pratique de l'MPPT d'un système éolien a permis de statuer sur la manière dont il devrait être connectés. Les résultats obtenus approuvent bien l'efficacité de telles approches.

*conclusion
générale*

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la commande d'une chaîne éolienne dédiée pour la production d'énergie électrique, ainsi que l'utilisation de la logique floue et l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien à vitesse variable. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation, l'analyse de fonctionnement et la commande.

Dans le contexte d'énergie éolienne un état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne est présenté dans le premier chapitre. La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie moteur de développement durable.

Dans le chapitre deux, nous avons modélisé le vent qui est la source principale d'énergie. Nous avons ensuite modélisé les différentes parties de la chaîne éolienne à savoir la turbine et machine synchrone à aimant permanent utilisée dans ce cas. une étude du redresseur à MLI par la présentation de sa structure, son fonctionnement, ainsi que sa commande. Cette structure particulière du redresseur nous a permis d'avoir une tension parfaitement redressée quelque soient les fluctuations du vent. L'onduleur a la même structure que celle du redresseur étudié et nous a permis d'obtenir des tensions de phases de la fréquence désirée.

Nous avons ensuite abordé le problème lié à la puissance électrique produite par la génératrice grâce à son entraînement par le vent. Nous avons élaboré des stratégies de commande permettant d'atteindre plusieurs objectifs concernant la puissance active et la puissance réactive à savoir une commande de la puissance active variable, et une commande de la puissance réactive égale à zéro.

Différents dispositifs de recherche du point optimal de puissance MPPT ont été Proposés dans le chapitre trois. Les techniques MPPT diffèrent aussi selon l'architecture et selon la connaissance

de la caractéristique de la voilure. Dans le cas où l'on ne connaît pas a priori la voilure, une recherche opérationnelle (MPPT) a été proposée grâce à un algorithme basé sur la logique floue. Le grand avantage de cette technique est qu'elle s'adapte à toute voilure presque instantanément sans mesures supplémentaires, mais dans certains cas d'évolution de la vitesse du vent, nous avons mis en remarquer le suivi insatisfaisant de cette technique.

Le dernier chapitre, a été consacré à la présentation des résultats de cette expérience avec des interprétations et comparaison des courbes entre le résultat de simulation et expérimental.

Toutefois bien d'autres questions méritent d'être abordées et d'autres commandes d'être testées. Ces questions pourraient constituer des perspectives pour enrichir ce travail. Nous pouvons citer à titre d'exemple :

- L'utilisation de la commande en tensions avec différentes structures MLI.
- Utilisation d'autres techniques de commande telle que la SVM.
- L'utilisation d'un onduleur multi niveaux afin d'éliminer plus d'harmoniques.

Annexes

Annexe-A -**Paramètre de la génératrice MSAP :**

$$R_s = 0.895 \Omega;$$

$$R_S = R_s;$$

$$L_D = 0.012H ;$$

$$L_Q = 0.0211H ;$$

$$J = 0.00141Kg.m^2 ;$$

$$F = 0.001 \frac{Nm}{rd}/s ;$$

$$p = 3;$$

$$K = 0.9 ;$$

$$R_{CH} = 50\Omega ;$$

$$L_{CH} = 0.002H$$

$$fif = 0.5Wb$$

% ***** %

Parameter de la Turbine:

$$Rho = 1.25m^{-3};$$

$$G = 40; 28; 15; 75;$$

$$J = 0.00176Kg.m^2;$$

$$f = 3.8e - 4 Nm/rd/s;$$

$$R = 2m; 0.5m;$$

$$H = 10m;$$

$$S = 2 * R * H;$$

Annexe-B -

1. Dimensionnement des régulateurs

La machine étant découplée selon deux axes "d" et "q", la régulation sur l'axe "d" est faite par une seule boucle, par contre la régulation sur l'axe "q" est faite par deux boucles en cascades l'une interne et l'autre externe.

1.1. Régulateur des courant « I_q »

Le contrôle de la vitesse de la MSAP nécessite la commande simultanée des deux variables I_d et I_q . Le système est composé d'une boucle de régulation de vitesse qui impose la référence du courant I_q . Le courant I_d est maintenu égale à zéro. D'après les équations (II.44) (II.45), on obtient le schéma de la figure (B.1) :

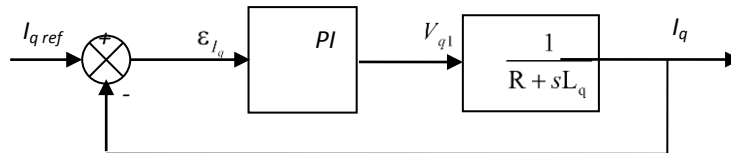


Figure B.1: Boucle de régulation du courant I_q

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par l'équation suivante :

$$FTBO = \frac{K_r(1 + \tau_{rq} S)}{\tau_{rq} S (R_s + L_q S)} \quad (B.1)$$

$$FTBO = \frac{K_r(1 + \tau_{rq} S)}{\tau_{rq} S R_s (1 + \frac{L_q}{R_s} \cdot S)}$$

En utilisant la méthode de compensation des pôles on aura :

$$FTBO = \frac{K_r}{\tau_{rq} R_s S} \quad (B.2)$$

Tel que :

$$\tau_q = \frac{L_q}{R_s} = \tau_{rq}$$

En boucle fermée la fonction s'écrit :

$$FTBF = \frac{\frac{K_r}{\tau_{rq} R_s S}}{1 + \frac{K_r}{\tau_{rq} R_s S}} = \frac{1}{\tau_{BFq} S + 1}$$

(B.3)

On prend généralement le temps d'établissement pratique suivant :

$$\checkmark \quad t_s = 3. \tau_q \quad (\text{Critère de } \pm 5 \%) \quad \text{et} \quad \tau_{BFq} = \frac{\tau_q}{N} \quad \Rightarrow \quad K_r = R_s N$$

t_s : temps de réponse imposé.

τ_q : Constante de temps électrique de l'axe "q".

1.2. Régulation du courant (I_d)

Le schéma de cette régulation est représenté par la figure (B.2) :

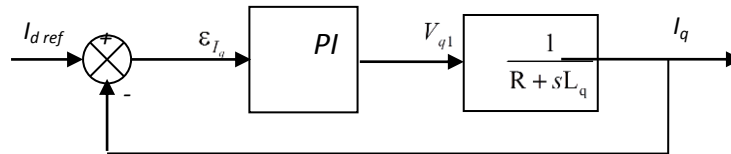


Figure B.2 : Boucle de régulation du courant I_d

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par l'équation suivante :

$$FTBO = \frac{K_{rd}(1 + \tau_{rd} S)}{\tau_{rd} S (R_s + L_d S)} \quad (\text{B.4})$$

$$FTBO = \frac{K_{rd}(1 + \tau_{rd} S)}{\tau_{rd} S R_s (1 + \frac{L_d}{R_s} \cdot S)}$$

En utilisant la méthode de compensation des pôles on aura :

$$FTBO = \frac{K_{rd}}{\tau_{rd} R_s S} \quad (\text{B.5})$$

$$\text{Tel que : } \tau_d = \frac{L_d}{R_s} = \tau_{rd}$$

En boucle fermée la fonction s'écrit :

$$FTBF = \frac{\frac{K_{rd}}{\tau_{rd} R_s S}}{1 + \frac{K_{rd}}{\tau_{rd} R_s S}} = \frac{1}{\tau_{BFd} S + 1} \quad (\text{B.6})$$

Lorsque $t_s = 3\tau_d$, on aura :

$$\tau_{BFd} = \frac{\tau_d}{N} \quad \Rightarrow \quad K_{rd} = R_s N$$

*Références
bibliographiques*

Bibliographie :

- [1] Syndicat des énergies renouvelables, www.enr.fr, dernière révision du document : juin 2012.
- [2] SATINFO (Société du Groupe Sonelgaz), « Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique », Mars 2011.
- [3] Stéphanie ANDRIEU, Directrice Générale d'URBASOLAR, « Energies Renouvelable Bilan et Perspectives », 31 Mai 2013.
- [4] Fondation d'entreprise ALCEN pour la connaissance des énergies, « Energie éolienne », 2013.
- [5] Simon Vinot « IFP Energies nouvelles », octobre 2012. www.ifpenergiesnouvelles.fr.
- [6] 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.
- [7] Lamri LOUZE, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée », thèse de Doctorat de l'université Mentouri Constantine, Soutenu le 08 Juillet 2010.
- [8] I. Vechiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France 2005.
- [9] C. Alonso, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie", Mémoire pour l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paul Sabatier-Toulouse III, France 2003.
- [10] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à 12, 2004.
- [11] Soltane BELAKEHAL, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents dédiées aux Energies Renouvelables », thèse de Doctorat de l'université de Constantine, Soutenu le 10 Juin 2010.
- [12] DUC-HOAN TRAN « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne 'passive' : analyse de robustesse, validation expérimentale » thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2010.
- [13] ABDENOUR ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Thèse de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.

- [14] S.HAMECHA « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », thèse de Magister de l'Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. 25 juin 2013.
- [15] Rachid ABDESSEMED « Modélisation et simulation des machines électriques » livre : électrotechnique/ éditions-ellipses.
- [16] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension" thèse de Doctorat de l'Université Lille, France, 2004.
- [17] Nicolas BERNARD, « Machine synchrone : de la boucle ouverte à l'autopilotage », Revue 3EI, n°30, septembre 2002, pp .24-39.
- [18] LATRECHE Mohammed Tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien » thèse de Magister de l'Université Ferhat Abbas de Sétif. 24 juin 2012
- [19] Carlos canudas de wit « modélisation contrôle vectoriel et DTC » livre : systèmes automatisés / édition-HERMES Science.
- [20] Mohamed MANSOUR, « Study and contol of a variable-speed wind-energy connected to the grid », International journal of Renewable Energy Research, Vol 1, N°2, pp 96-104, 2011.
- [21] Tarak GHENNAM, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat de l'école Militaire Polytechnique d'Alger, le 29 septembre 2011.
- [22] L. Abdelhamid, « Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement », thèse de Doctorat de l'université de BATNA, 26 avril 2012.
- [23] S. BELLARBI « Simulation de chaînes de conversion d'énergie appliquée à une éolienne de type Savonius », article : Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES, Bou-Ismaïl
- [24] Geng Hua, Yang Geng, « A Novel Control Strategy of MPPT Taking Dynamics of Wind Turbine into Account » IEEE, P.R.China.
- [25] Wu Guoxiang, "A Comprehensive Control Strategy for Variable-speed Constant-Frequency Wind Power Generation", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008, Harbin, China.
- [26] Md. Arifujjaman, "Modeling and Control of a Small Wind Turbine", IEEE CCECE/CCGEI, Saskatoon, May 2005.
- [27] A. Bouhedda, « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne », thèse de Magister de l'Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. 07 juillet 2011.

- [28] Adinda Ihsani Putri, Minho Ahn, and Jaeho Choi, « *Speed Sensorless Fuzzy MPPT Control of GridConnected PMSG for Wind Power Generation* », IEEE School of Electrical Engineering, Chungbuk National University 52 Naesudong-ro, Heungduk-gu, Cheongju, Chungbuk, 361-763, South Korea.
- [29] Shakil Ahamed Khan, Md. Ismail Hossain, " Intelligent Control Based Maximum Power Extraction Strategy for Wind Energy Conversion Systems", Dept. of EEE, Rajshahi University of Engineering & Technology, Bangladesh, IEEE CCECE 2011 – 001043.
- [30] Shakil Ahamed Khan, Md. Ismail Hossain, " Intelligent Control Based Maximum Power Extraction Strategy for Wind Energy Conversion Systems", Dept. of EEE, Rajshahi University of Engineering & Technology, Bangladesh, IEEE CCECE 2011 – 001043.
- [31] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Docteur de l'École Normale Supérieure de Cachan 2002.