REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière **: Automatiques et Systèmes.**

Spécialité **: Automatiques et Systèmes.**

Commande MPPT d'un système éolien résidentiel connecté au réseau électrique par la technique essaim de particule

Présenté par :

SKENDER LOKMANE

KHELLADI SABRINE

Proposé et Dirigé par :

Dr. ABBADI.A

Dr. HAMIDIA.F

Promotion 2022

Table des matières

Remerciement… I

Dédicace II

Résumé… V

Liste des figures VI

Liste des tableaux VIII

Liste des abréviations… IX

Liste des symboles X

Remerciements

Avant tout, on remercie ALLAH, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons bien sûr à remercier nos parents qui nous ont soutenues psychiquement durant toutes nos études. Depuis le collège jusqu'à l'université.

Nous tenons à remercier nos encadreurs Dr ABBADI Amel d'avoir posé un sujet très intéressent et pour leurs conseils, leur disponibilité et pour nous avoir fait profiter de leurs connaissances et de leurs qualités tant professionnelles qu'humaines.

Nos remercîments s'adressent également, aux membres de jury, qui nous font l'honneur d'évaluer notre modeste travail.

Nous remercions aussi tous les étudiants qui nous ont aidées par d'un conseil ou d'une idée d'un encouragement au cours de cette année.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes

parents qui m'ont soutenus pour me permettre de réaliser tous

mes objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et

ma gratitude.

A mes frère, ma sœur et toute ma famille

A mon chère petit Iyad

A tous mes camarades et mes amis en particulier zinou ,

rym , adel , walid , abdou wahid , raouf , farouk , ismail

Dédicace

A mes très chers parents

Aucun mot ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers les personnes les plus chères à mes yeux

Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, le modèle parentale idéal

Vous m'avez toujours soutenue, encourager, dans mes études comme dans ma vie quotidienne

Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour.

A ma deuxième maman ma grande sœur Ouidad et son mari Anouar qui ont été toujours présent pour moi

A mes deux sœurs Nassiba et Faiza qui sont loin de moi mais toujours si présent

A mon petit frère Sidali qui me pousse plus loin toujours

Que dieu vous protèges vous êtes ma fierté

A mon future mari

A ma chère famille

A mon chère oncle Mohammed KHELLADI qui m'as toujours soutenu

A mes chers cousins(es)en particulier Soumaya, Maroua, Bessma, Sarah, Chahinez, Mohamed, Mourad, Imad.

A mes chers amis (es) en particulier Hanane, Souad, Nadia, Fella, Rym, Zahreddine, Zineddine et mon binôme Lokmane

A mes collègues 2021/2022

ملخص

ئؤذم مزٍ اٌلطشودت ئؤٌّٕت ركٕت اللئقاط أقصى طاقت MPPT)أقصى ئتبع لٌّقطت الطاقت(لتسبٕٚاث الشياح السكٌّٕت الوئصلت بالشبكت. ئعتوذ مزٍ الئؤٌّٕت على PSO)تذسٕٚي دشذ الجسٕٚواث(. ٕٚئكى مبذأ مزٍ الخىاسصمٕت مي البذث عي ًّقطت الئشغٕل الوثلى بٌّا ً عل مبادئ الٌّظٕن الزاتي الذي ئسوخ لوجوىعت مي الكائٌّاث الذٕت بالعول مً بطشٕقت معقذة ، بٌّا ً عل "ذىاعذ" بسٕطت. ئن ئأكٕذ صذت وأداء الئؤٌّٕت الوقتشدت عي طشٕق الوذاكاة عل MATLAB / SIMULINK. اسخجابت الٌّظام بهزٍ الخاسصمٕت دقٕقت وسشٕعت في مىاجهت الئتابٕي ني سشعت الشياح.

الكلمات المفتاحية

)أقصى ئتبع لٌّقطت الطاقت(MPPT ,)تذسٕٚي دشذ الجسٕٚواث(PSO , تسبٕٚاث الشياح السكٌّٕت الوئصلت بالشبكت

Résumé

Ce mémoire présente une technique intelligente de capteure de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking) d'une éolienne résidentielle connectée au réseau. Cette technique est basée sur le PSO *(*Particle Swarm Optimization).Le principe de cet algorithme consiste à chercher le point de fonctionnement optimal ense basant sur les principes d'auto-organisation qui permettent à un groupe d'organismes vivants d'agir ensemble de manière complexe, à partir de "règles" simples. La validité et les performances de la technique proposée sont confirmées par simulation sur MATLAB/SIMULINK. La réponse du système avec cet algorithme est précise et rapide face à la variation de la vitesse du vent.

Mots clés : MPPT (Maximum Power Point Tracking), PSO *(*Particle Swarm Optimization), éolienne résidentielle connectée au réseau.

Abstract

This thesis presents an intelligent technique for capturing the maximum power MPPT (Maximum Power Point Tracking) of a residential wind turbine connected to the network. This technique is based on PSO (Particle Swarm Optimization). The principle ofthis algorithm consists of seeking the optimal operating point based on the principles of self-organization that allow a group of living organisms to act together in a complex way,based on simple "rules". The validity and performance of the proposed technique are confirmed by simulation on MATLAB/SIMULINK. The response of the system with thisalgorithm is precise and fast in the face of the variation in wind speed.

Keywords: MPPT (Maximum Power Point Tracking), PSO (Particle Swarm

Optimization), residential wind turbine connected to the network.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Généralité sur l'énergie éolienne.

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....3
Figure I.2 : Principe de la conversion d'énergie..... 3
Figure I.3 : Technologie éolienne à axe vertical. 4
Figure I.4 : Technologie éolienne à axe horizontale 5
Figure I.5 : Composition d'une éolienne..... 7
Figure I.6 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW 8
Figure I.7 : Schéma d'une éolienne Enercon à entraînement direct 9
Figure I.8 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable. 11

CHAPITRE II : Déscription du système éolien résidentiel connecté au réseau.

Figure II.1 : Schéma fonctionnel général d'un système éolien résidentiel raccordé au réseau. 14
Figure II.2 : Schéma de la turbine éolienne..... 14
Figure II.3 : Courbe Cp(λ). 15
Figure II.4 : Caractéristiques $P_{eol}(\Omega)$ 16
Figure II.5 : Caractéristiques $C_{eol}(\Omega)$ 16
Figure II.6 : La simulation de commande MLI 18
Figure II.7 : Structure du générateur éolien étudié 19
Figure II.8 : Symbole de l'onduleur..... 19
Figure II.9 : Schéma d'un onduleur en pont. 20
Figure II.10 : L'allure de la tension aux bornes de la charge 21
Figure II.11 : La tension aux bornes de la charge 21
Figure II.12 : Courant d'une charge résistive 21

Figure II.13 : La tension et le courant aux bornes de la charge inductive. 23
Figure II.14 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi - pont. 23
Figure II.15 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé en pont. 24
Figure II.16 : Structure de principe d'une PLL triphasée (a) et monophasée (b)..... 25
Figure II.17 : Filtre LCL 25

CHAPITRE III MPPT classique et intelligence artificiel

Figure III.1 : Modélisation du système connectée au réseau via deux convertisseurs (redresseur et onduleur). 26
Figure III.2 : Classification des techniques MPPT..... 28
Figure III.3 : Le fonctionnement de l'algorithme P&O. 29
Figure III.4 : Organigramme de la méthode P&O..... 30
Figure III.5 : Principe de la méthode InCond..... 31
Figure III.6 : Organigramme de la méthode InCond 32
Figure III.7 : Principe de la méthode Hill climb. 33
Figure III.8 : Algorithme de la méthode Hill climb. 34
Figure III.9 : Une structure ANN typique pour MPPT..... 35
Figure III.10 : Structure de base de la commande floue..... 36
Figure III.11 : Organigramme de la MPPT par PSO..... 39

CHAPITRE IV :Résultat de simulation d'un system éolien Connecté au réseau

Figure IV.1 : Environnement MATLAB.....42
Figure IV.2 : Schéma de commande de l'onduleur 43
Figure IV.3 : Vitesse du vent, vitesse du rotor, coefficient de puissance pour le premier profil de la vitesse du vent 44
Figure IV.4 : La puissance générée par le système éolien 44
Figure IV.5 : Performance de la tension du bus continu..... 45
Figure IV.6 : Tension et courant de charge résidentielle 45

Figure IV.7 : La tension et le courant de la charge résidentielle sont en phase..... 46
Figure IV.8 : Les puissances éolienne et la puissance active de la charge résidentielle 46
Figure IV.9 : Vitesse du vent, vitesse du rotor, coefficient de puissance pour le deuxième profil de la vitesse du vent 47
Figure IV.10 : La puissance de l'énergie éolienne..... 48
Figure IV.11 : Performance de la tension du bus continu 48
Figure IV.12 : Tension et courant de la charge résidentielle.....49
Figure IV.13 : La tension et le courant de la charge résidentielle sont en phase..... 49
Figure IV.14 : les Puissances éolienne et la puissance active de la charge résidentielle.50
Fig. IV.15 : La distorsion harmonique totale du courant de charge résidentiel pour le premier profil de la vitesse du vent avec le contrôleur PSO MPPT et contrôleur MPPT P&O 50
Fig. IV.16 : La distorsion harmonique totale du courant de charge résidentiel pour le deuxième profil de la vitesse du vent avec le contrôleur PSO MPPT et contrôleur MPPT P&O 51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1. Tableau de vérité de l'algorithme « Perturbation & observation » 30

Tableau III.2 : Exemple d'une table de règles pour une commande logique floue..... 36

.

Liste des abréviations

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

DC : Courant Continu (Direct Current).

DC/AC : Courant continu- alternatif.

Hill climb : Hill Climbing

InCond : conductance Incrémentale.

MLI (PWM) : Modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulation).

MPPT : Suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking).

P&O : Perturbation et Observation.

PLL : Boucle de verrouillage de phase (Phase Lock Loop).

PPM : Point de puissance maximale.

PSO : Particle Swarm Optimization.

RNA : Réseaux de neurones artificiels

THD : Total Harmonie Distorsion.

VSC : Convertisseur source de tension.

LISTE DES SYMBOLES

C_ρ : Le coefficient de puissance.

β : l'angle de calage des pales

D1 et D4 : des diodes

ΔE : Le changement d'erreur

ΔVref : La variable de sortie est la tension de référence.

ΔV_i (t+1) : La variation de la tension de référence de la particule i à l'instant (t+1)

ΔV_i (t) : La variation de la tension de référence de la particule i à l'instant (t);

E : L'erreur.

I_{dcref} : Courant de reference.

Id et Iq : Les régulateurs des composants active et réactive des courants

i_{sq}, i_{sd} : Les courants statoriques dans le repère de Park (A)

$P_{incidente}$: La puissance incidente du vent.

$P_{extrate}^{max}$: La puissance maximale extractible.

p , ω : Le nombre de pair de pôles de la machine synchrone et la pulsation des tensions (rad/s).

ρ : La masse volumique de l'air (kg/m3).

R : la longueur de la pale

R_s , L_s : Les résistances statoriques.

R_p : Le rayon de pale de l'éolienne.

S1 , S2 : Des interrupteurs.

S : Surface balayée par les pales de la turbine éolienne en m2.

T1 et T4 : Des transistors.

V : Vitesse du vent.

Vdc : Le régulateur de la tension du bus continu

V_d et V_q : Les sorties de tension du régulateur de courant.

V_n : La vitesse nominale.

$V_i(t)$: La tension de référence de la particule *i* à l'instant (*t*).

V_{sq} , V_{sq} : Les tensions statoriques dans le repère de Park [V].

V_p : Le pic de l'onde modulatrice.

V_T : Le pic de l'onde porteuse.

Vref : La tension de référence.

$Vref_i(t+1)$: La tension de référence de la particule *i* à l'instant $(t+1)$;

$V_i(t)$: La tension de référence de la particule *i* à l'instant (*t*) ;

$Vref_{op_i}$: La meilleur tension de référence de la particule *i* ;

$Vref_{op_g}$: La meilleur tension de référence global (de toutes les particules de l'essaim).

w, $\boldsymbol{c1}$, $\boldsymbol{c2}$, $\boldsymbol{r1}$, *r2* : Les constantes d'optimisation

$fi_{turbine}$: La vitesse de la turbine

Ω_d: La vitesse de rotation avant multiplicateur (axe lent).

λ : La vitesse relative.

Sommaire

Chapitre I : *Généralité sur l'énergie éolienne*

I.1 Introduction 1

I.2 La production éolienne 1

I.3 Définition de l'énergie éolienne 2

I.4 Types des turbines éoliennes 3

I.4.1 Eolienne à axe vertical 3

I.4.1.1 Avantages 4

I.4.1.2 Inconvénient 4

I.4.2 Eoliennes à axe horizontal 4

I.4.2.1 Avantages 4

I.4.2.2 Inconvénient 5

I.5 Principaux composants d'une éolienne 5

I.6 Constitution d'une éolienne moderne 6

I.7 Fonctionnement optimal d'une éolienne 8

I.7.1 Système d'orientation des pales ou "Pitch Control" 10

I.7.2 Système à décrochage aérodynamique ou "Stail Control" 11

I.8 Conclusion 11

CHAPITRE II : *Déscription du système éolien résidentiel connecté au réseau*

II.1 Introduction 13

II.2. Description du système éolien résidentiel raccordé au réseau 13

II.2.1 Modélisation de la turbine 14

II.2.2 Modèle de la machine synchrone 16

II.2.3 Redresseur MLI

II.2.4 Convertisseur DC/AC 19

II.2.4.1 Onduleur monophasé

II.2.4.2 Onduleur triphasé 24

II.2.5 Synchronisation par PLL 24

II.2.6 Filtre LCL 25

II.3 Conclusion 25

Chapitre III: *TECHNIQUES MPPT*

III.1 Introduction 26
III.2 Poursuite du point de puissance maximale 26
III.3 Classification des techniques MPPT 27
III.3.1 Techniques de recherche du point de puissance maximal local 28
III.3.1.1 MPPTs classiques 28
III.3.1.2 MPPT d'intelligences artificielles 34
III.3.2 Techniques de recherche du point de puissance maximal global (MPPT avec la technique d'optimisation par essaims des particulaires) 36
III.4 Conclusion 40

CHAPITRE IV :*Résultat de simulation d'un system éolien Connecté au réseau*

IV.1 Introduction 41
IV.2 Introduction à MATLAB 41
IV.2.1 Mode interactif 41
IV.2.2 Mode executive 41
IV.3 Les régulateurs de l'onduleur monophasé en pont 43
IV.4 Simulations 43
IV.4 .1 Le premier profil 43
IV.4 .1.1 Performance du système coté source 44
IV.4 .1.2 Performance du système coté bus continu 45
IV.4 .1.3 Performance du système coté charge 45
IV.4 .2 Le deuxième profil 47
IV.4.2.1 Performance du système coté source 47
IV.4 .2.2 Performance du système coté bus continu 48
IV.4 .2.3 Performance du système coté charge 48
IV.4 .3 Le spectre harmonique du courant de la charge résidentielle 50
IV.5 Conclusion 51

Introduction générale

Depuis l'éclatement du sujet de l'échauffement terrestre et de la préoccupation mondiale pour la protection de l'environnement d'une part et face à la flambée des prix du pétrole et l'épuisement des sources d'énergies fossiles d'autre part, différentes solutions de substitution ont été envisagées notamment les sources d'énergie renouvelables.

Les opérateurs du secteur de l'énergie électrique s'acharnent à diversifier leur bouquet énergétique plus spécialement par une énergie propre et renouvelable de source géothermique, biomasse, solaire ou éolienne. L'énergie verte à base d'une éoliennesemble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé [1]. Ainsi son utilisation est devenue de plus en plus importante que ce soit en l'injection sur le réseau électrique ou en l'utilisant dans des sites isolés.

Si la filière du grand éolien (fermes de forte puissance, sites offshore,…) est en pleine expansion, l'idée de décentraliser l'énergie en produisant de petites quantités de façon localisée (proche du besoin) est de plus en plus présente. C'est dans le contexte des petites éoliennes, raccordées au réseau, que se focalise l'objectif de ce mémoire.

Pour produire le maximum d'énergie, la technique de poursuite du point de puissance maximale 'maximal power point Tracking' (MPPT) a été utilisée. Cette dernière permet de rechercher et de poursuivre le point de puissance maximale en permanence.

Dans ce sens, l'optimisation par une des méthodes méta éristique (PSO) sera l'objectif primordial de notre travail, pour détecter le point de puissance maximale dans un système éolien résidentiel connecté au réseau sous différentes conditions climatiques (vitesse du vent)

Ainsi, ce mémoire inclue chapitres suivants : le premier chapitre sera dédié à des généralités sur l'énergie éolienne. Un deuxième chapitre est réservé à la description de notre système d'étude. Un troisième chapitre présentera la description de différents algorithmes MPPT pour optimiser la puissance et enfin un quatrième chapitre pour exposer les différentes simulations faites ainsi que pour discuter les résultats trouvés. En dernier lieu, une conclusion résumera les grandes lignes et phases essentielles de ce travail.

Chapitre I :

Généralité sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction

Les besoins énergétiques de la planète s'amplifient à une vitesse croissante dans toutes les régions du monde. La dépendance excessive vis-à-vis des importations d'énergie en provenance d'un petit nombre de pays, pour la plupart instables politiquement, et la volatilité des prix du pétrole et du gaz se traduisent par une situation chancelante de l'approvisionnement énergétique qui représente déjà un lourd fardeau pour l'économie mondiale. D'autre part les effets néfastes des combustibles fossiles sur l'environnement ajoutent une autre dimension à ce problème. Les usines d'énergie chargent l'atmosphère en gaz qui génèrent les effets de serre et des particules créant ainsi des îlots de chaleur et cause principale des changements du climat. La génération et la consommation d'énergie sont responsables de 50 à 60 pour cent des gaz à effets de serre émis dans l'atmosphère. L'utilisation intense d'énergie augmente la pollution atmosphérique ce qui laisse penser la croissance supplémentaire de la pollution dans le proche avenir. De là vient l'importance de soutient des sources d'énergie comme celle du vent [1].

I.2 La production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [2].

I.3 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.1) [3], [4], [5].

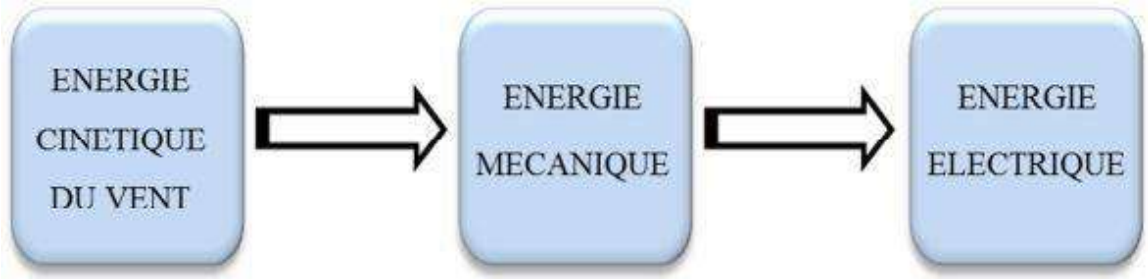


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [5]

Cette conversion 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.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure I.2

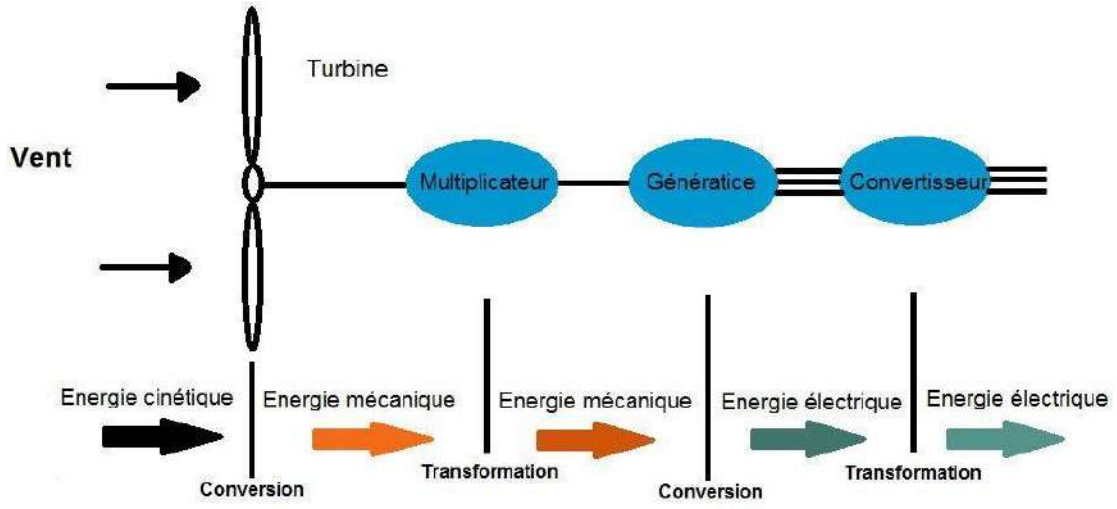


Figure I.2 : Principe de la conversion d'énergie

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, propre (sans rejet atmosphérique), géographiquement diffuse et sa source (vent) est très importante en hiver. Cependant, le

captage et la conversion d'énergie sont complexes, les matériaux sont coûteux et la source d'énergie est difficile à prévoir et reste aléatoire [4].

I.4 Types des turbines éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se défèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient [6] :

- Des éoliennes à axes verticales
- Des éoliennes à axes horizontal

I.4.1 Eolienne à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées, cependant deux structures seulement sont parvenues au stade de l'industrialisation ; à savoir, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [6].

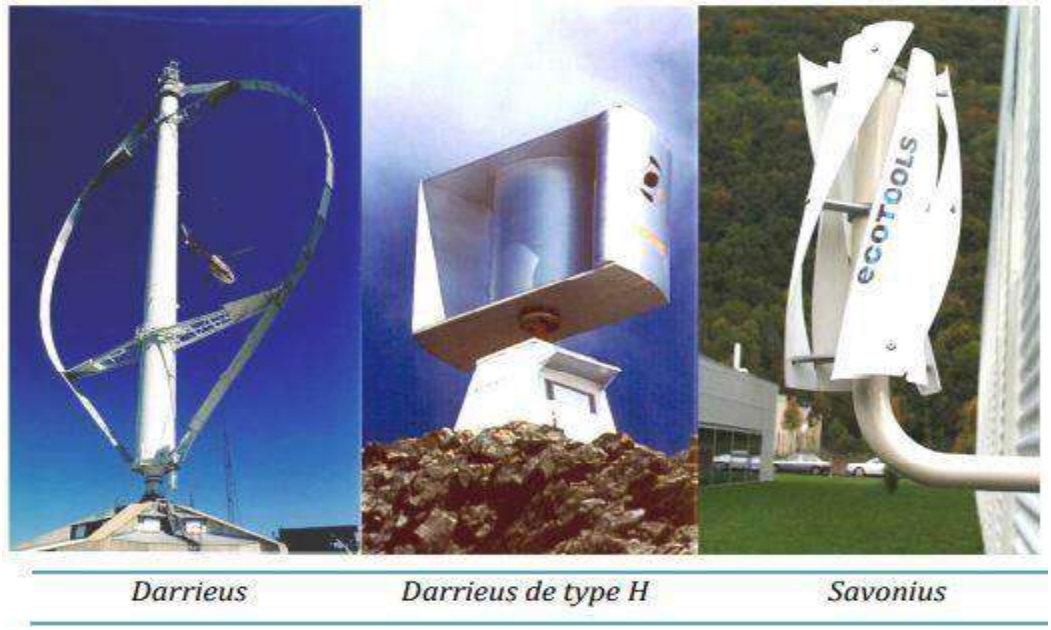


Figure I.3 : Technologie éolienne à axe vertical.

De nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins repandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [7] [6].

I.4.1.1 Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol ;
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de la faire fonctionner quel que soit la direction du vent et sans avoir à orienter le rotor ;
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien [19].

I.4.1.2 Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal ;
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car il est freiné par le relief ;
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.4.2 Eoliennes à axe horizontal

C'est les éoliennes les plus répandues actuellement, sans doute à cause de leurs avantages remarquable. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [8] [6].

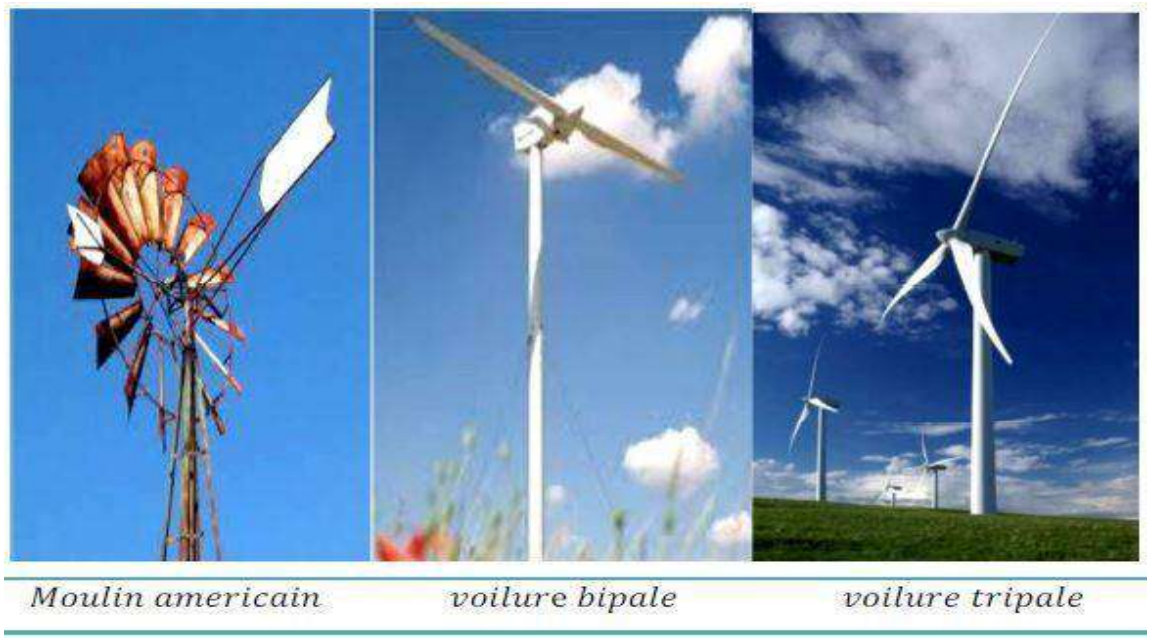


Figure I.4 : Technologie éolienne à axe horizontale.

I.4.2.1 Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical ;

- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol ;
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

I.4.2.2 Inconvénient

- Coût de construction très élevé ;
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés.
Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [6].

I.5 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux [2], [4]:

- **Le mât** :

Généralement, c'est un tube d'acier. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations au niveau du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

- **La nacelle** :

La nacelle est montée au sommet du mât et abrite les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. La nacelle peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction.

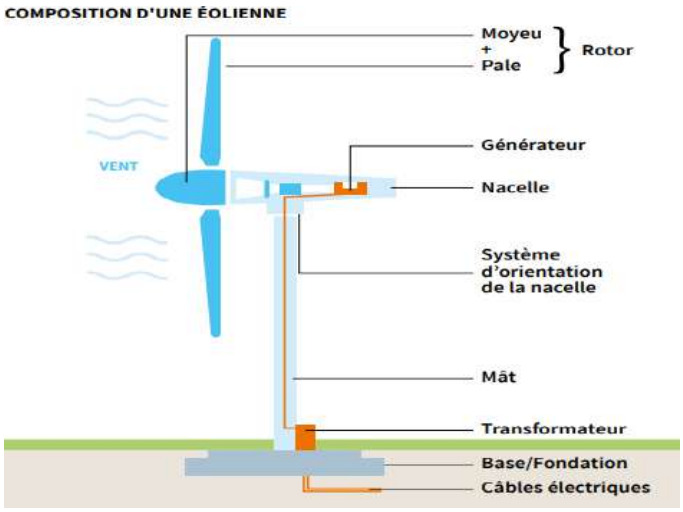


Figure I.5 : Composition d'une éolienne.

- **Le rotor** :

Le rotor est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire et le bruit [4].

I.6 Constitution d'une éolienne moderne

La Figure. I.6 représente une chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 (1.3MW) [10].

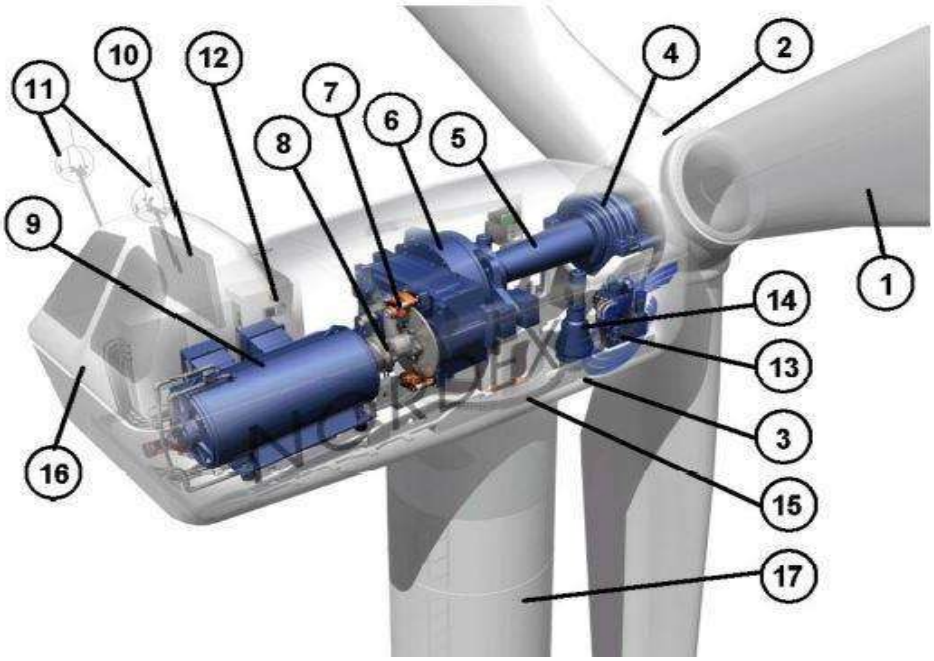


Figure I.6 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW.

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter, déclencher ou arrêter l'éolienne selon la vitesse du vent [12]. Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances.

C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôleset donc à fort couple massique [11]. Le fabricant allemand Enercon propose ainsi toute une gamme de telles machines de 200 kW à 4,5 MW (phase de pré-industrialisation). La

Figure I.7 montre le schéma de la nacelle d'une telle machine. Le diamètre de la nacelle est plus élevé mais sa longueur est plus courte.

Ces génératrices, dont la vitesse de rotation et le nombre de pôles rendent impossible une connexion directe au 50 Hz, sont nécessairement alimentées par un convertisseur statique qui offre la possibilité d'un fonctionnement à vitesse variable [11].

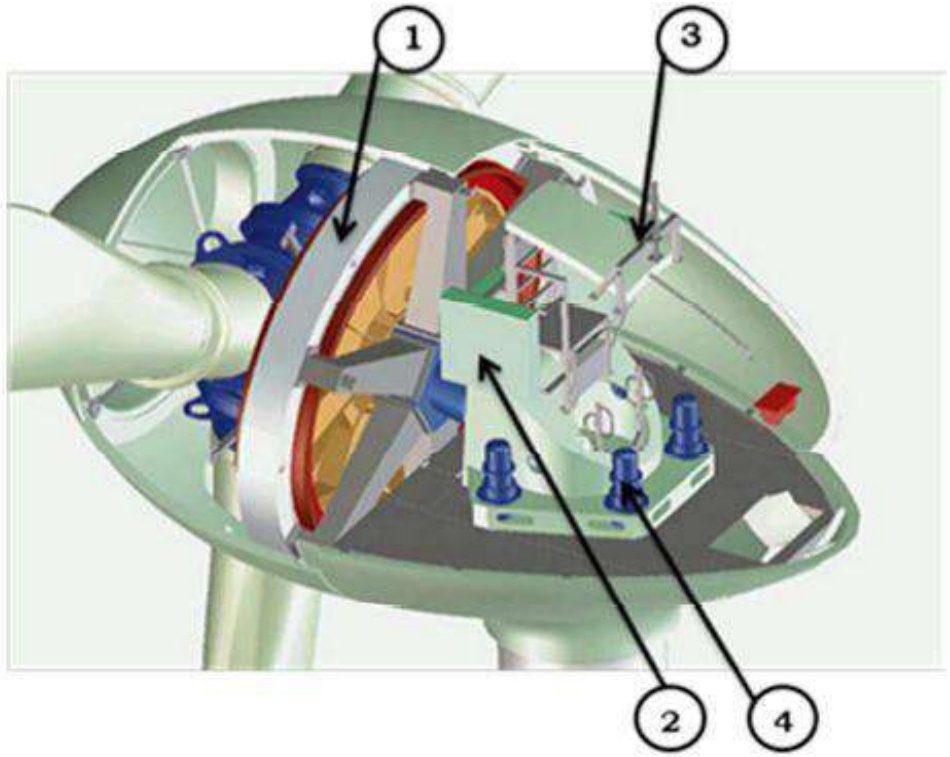


Figure I.7 : Schéma d'une éolienne Enercon à entraînement direct [11].

1 : Alternateur discoïde
2 : Convertisseurs électronique
3 : Système de refroidissement
4 : Système d'orientation [12].

I.7 Fonctionnement optimal d'une éolienne

La relation

$$P^{Max}_{Extrate} = C_{\rho}(\lambda).P_{incidente} = \frac{1}{2} C_{\rho}(\lambda).\rho.S.V^3 \quad \text{(I.1)}$$

Où :

$$C_{\rho}(\lambda) = \frac{P^{max}_{extrate}}{P_{incidente}}$$

Et :

$$R_p \,.\, \Omega_d$$

$$\lambda = \frac{}{V}$$

C_ρ : Le coefficient de puissance.

$P_{incidente}$: la puissance incidente du vent.

$P_{extrate}^{max}$: la puissance maximale extractible.

λ : La vitesse relative.

Ω_d: La vitesse de rotation avant multiplicateur (axe lent).

R_p : Le rayon de pale de l'éolienne.

ρ : masse volumique de l'air $(1,20\ \frac{\text{kg}}{\text{m3}}$pour l'air à 20°C) .

S : surface balayée par les pales de la turbine éolienne en m2.

V : vitesse du vent.

La relation (I.1) indique que la puissance éolienne captée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent (V). Donc, il existe pour la puissance éolienne nominale P_n une vitesse du vent nominale pour laquelle l'aérogénérateur est bien dimensionné dans ses divers éléments [5], [13], [19]. C'est pour cela que la turbine éolienne doit modifier ses paramètres, afin de maintenir la vitesse à sa valeur nominale et d'éviter toute destruction mécanique.

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, [13], [4], [5], [14], [15] :

- **Zone 1 :** La vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.
- **Zone 2 :** Le vent atteint une vitesse minimale V_{Min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale V_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation.
- **Zone 3 :** Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas endommager l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale V_{Max}, une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

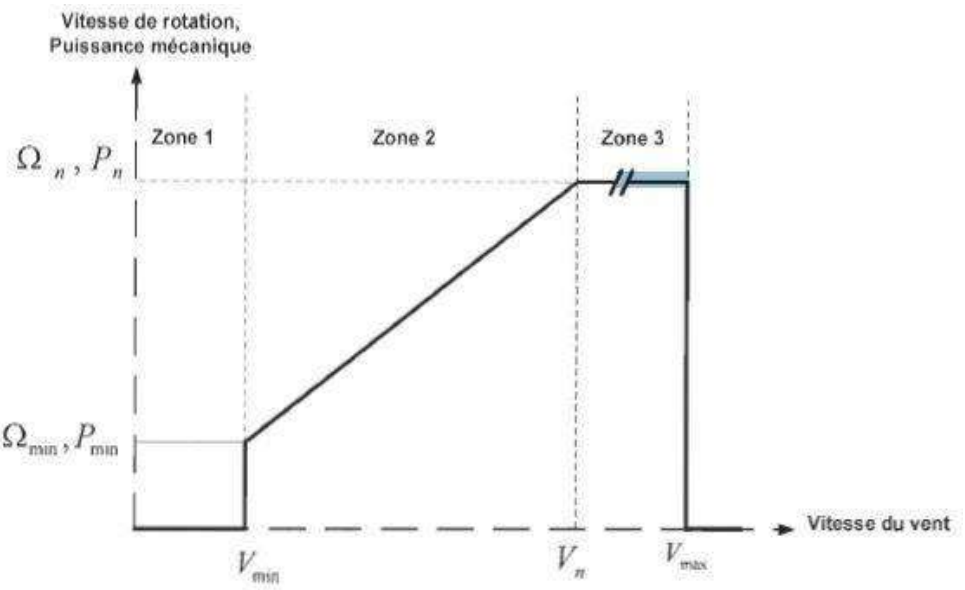


Figure I.8 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle connues surtoutdans les grandes turbines sous les noms de « Pitch Control » et « Stail Contol » [16].

I.7.1 Système d'orientation des pales ou "Pitch Control"

C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse du vent et de la puissance active à extraire.

En agissant par le pitch control, le coefficient de puissance C_p ne varie plus en fonction de λ mais en fonction de la vitesse du vent à vitesse de rotation constante, ce qui va permettre de maintenir la puissance constante dans la zone 3 à sa valeur maximale [5], [14], [17].

En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne va permettre certaines actions distinctes [14], [18] :

- L'optimisation du régime de conversion de l'énergie quand la vitesse du vent évolue entre V_{min} et V_n;
- La régulation par limitation de la puissance pour une vitesse du vent supérieure à la vitesse nominale V_n ;
- La protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent (>V_{max}) par la mise en drapeau des pales sans nécessité l'utilisation d'un système puissant de freinage pour les arrêts d'urgence.

I.7.2 Système à décrochage aérodynamique ou "Stail Control"

Cette méthode se base sur les caractéristiques mêmes du profil de pale en utilisant le procédé de décrochage aérodynamique. Les pales des éoliennes qui utilisent ce procédé, sont prévues pour décrocher à des vitesses de vents supérieures à la valeur nominale.

Lorsque la vitesse du vent dépasse cette valeur, l'angle d'incidence devient important [5],[18]. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales qui peuvent être fabriquées avec un pas variable suivant la position le long de la pale et possèdent aussi un mécanisme de freinage en bout [14]. Cette technique a aussi quelques avantages [5], [14],[18] :

- Pas de système de contrôle d'angle de calage;
- Construction plus simple et moins coûteuse du rotor;
- Maintenance plus aisée et un contrôle simple et efficace de la puissance.

Cependant, ce système de contrôle manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté [5]. Certains aérogénérateurs utilisent un système hybride nommé le Stail Actif qui combine les avantages des deux systèmes où le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le cas du système de pitch control.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne (Définition de l'énergie éolienne, production de l'énergie éolienne). Nous avons également parlé des différents types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal (ces avantages et ces inconvénient), la constitution d'une éolienne moderne et le fonctionnement optimal d'une éolienne.

CHAPITRE II :

Déscription du système éolien résidentiel connecté au réseau

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons aborder la composition du système éolien résidentiel connecté au réseau. Le générateur éolien se compose d'une turbine à vitesse variable lié directement a une génératrice synchrone a aimants permanents. Cette source est raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance MLI. Le système résidentiel est raccordé aussi aux réseaux électriques. La synchronisation est assurée par PLL.

II.2. Description du système éolien résidentiel raccordé au réseau

L'objectif assuré par le système éolien résidentiel raccordé au réseau est la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique alternative adaptée au réseau. Ce système est composé essentiellement des éléments suivants (figure II.1) :

- Une turbine et une machine synchrone à aimant permanent.
- D'une commande MPPT qui permet de faire fonctionner le générateur éolien de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance.
- D'un onduleur DC/AC (Convertisseur DC/AC monophasé) utilisé pour bien adapter la source à la charge et au réseau électrique c'est-à-dire convertir la tension continue issue du système éolien en courant alternatif.
- D'un module de commande de l'onduleur, une charge résidentielle et à un réseau de distribution.
- D'une commande PLL capable d'évaluer d'une manière correcte l'angle de phase de la tension d'un réseau idéal. Cet angle de phase permet de synchroniser la source d'énergie éolienne avec le réseau électrique.

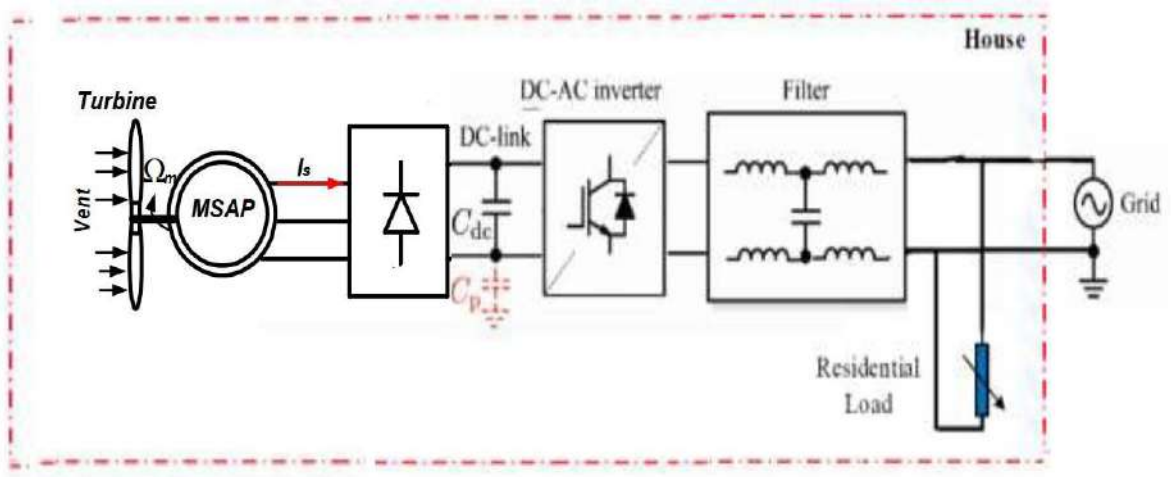


Figure II.1 : Schéma fonctionnel général d'un système éolien résidentiel raccordé au réseau.

II.2.1 Modélisation de la turbine

L'éolienne étudiée ici est constituée de pales de longueur R qui entraînent une génératrice à travers l'arbre de la turbine (Figure II.2).

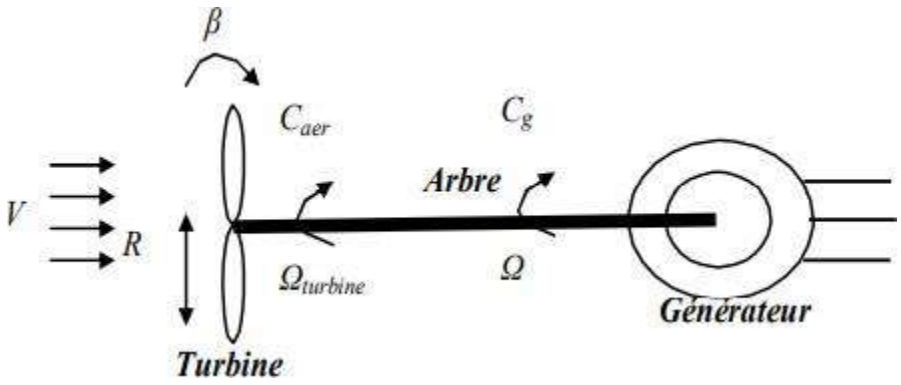


Figure II.2 : Schéma de la turbine éolienne.

La puissance du vent p_v ou puissance éolienne est définie comme suit [20] :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho.C.V^3 \qquad \text{(II.1)}$$

où ρ représente la masse volumique de l'air (kg/m3), V la vitesse du vent (m/s), C la surface utile traversée par le vent et qui a pour expression:

La puissance aérodynamique P_{aer} apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit [20] :

$$P_{aer} = C_p(\lambda,\beta).P_v = C_p(\lambda,\beta).\frac{1}{2}\rho.C.V^3 \qquad \text{(II.2)}$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient est en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle d'orientation de la pale β

Le coefficient λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [20] :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine}}{V}.R \tag{II.3}$$

où : $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine et R la longueur de la pale ;

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique peut être donné comme suit :

$$C_{aer} = \frac{P_{ear}}{\Omega_{turbine}} = C_p.\frac{\rho.C.V^3}{2\Omega_{turbine}} \tag{II.4}$$

La figure.II.3 représente le tracé de la caractéristique Cp (λ,). La caractéristique relative à la fonction Cp (λ) est utilisée dans la conception du générateur éolien, avec laquelle, on peut déterminer la puissance du rotor correspond à toute combinaison de la vitesse du vent et celle du rotor.

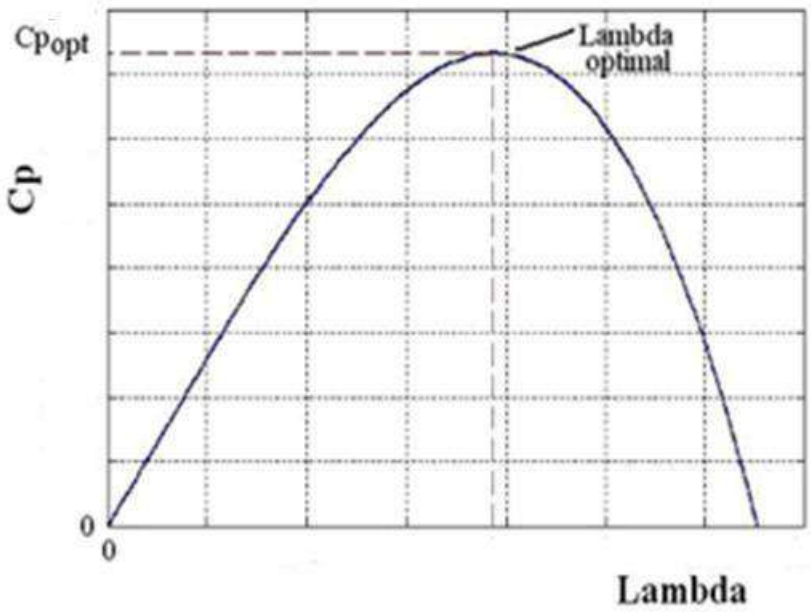


Figure II.3 : Courbe Cp(λ).

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

$$C_{eol} = P_{eol} / \Omega_{turbine} \tag{II.5}$$

Ou encore :

$$C_{eol} = \frac{C_p(\lambda,\beta) \times R^2 \times H \times \rho \times V^2}{\lambda} \quad \text{(II.6)}$$

Les figures 4 et 5 représentent un réseau de caractéristiques respectivement de la puissance et du couple éoliens en fonction de la vitesse de rotation, le paramètre étant la vitesse du vent.

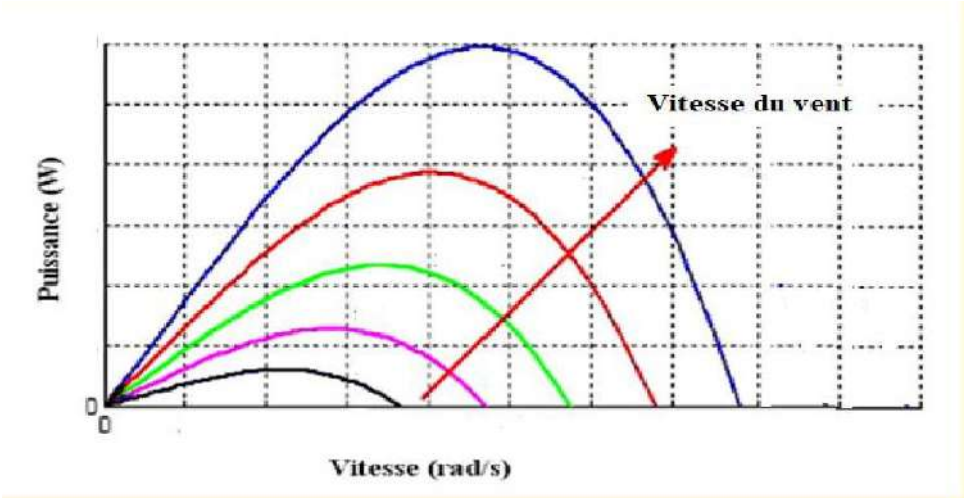


Figure II.4 : Caractéristiques $P_{eol}(\Omega)$

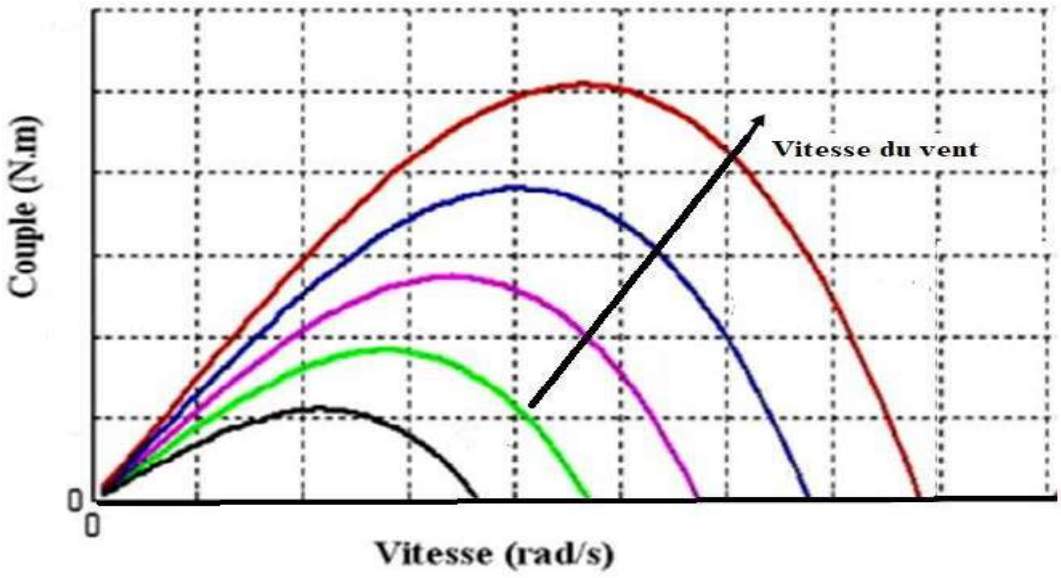


Figure II.5 : Caractéristiques $C_{eol}(\Omega)$

II.2.2 Modèle de la machine synchrone

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (performances, robustesse, …), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour une application en générateur couplé à une turbine éolienne.

La modélisation de la machine synchrone à aimants permanents a déjà fait l'objet de nombreux travaux. Le modèle le plus adéquat pour étudier le comportement dynamique de la machine et pour l'implémentation des lois de commande est inspiré des travaux [21, 22].

Un modèle dans le repère de Park de cette machine sera utilisé. Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage.

Les équations de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$V_{sd} = R_s.i_{sd} + L_s\frac{di_{sd}}{dt} - L_s.\omega.i_{sq} \quad \text{(II.7)}$$

$$V_{sq} = R_s.i_{sq} + L_s\frac{di_{sq}}{dt} + L_s.\omega.i_{sd} + K_A.\omega \quad \text{(II.8)}$$

$$C_{em} = p.K_a.i_{sq} \quad \text{(II.9)}$$

$$\omega = p.\Omega_{turbine} \quad \text{(II.10)}$$

Avec: i_{sq}, i_{sd} les courants statoriques dans le repère de Park (A), et V_{sq} et V_{sq} les tensions statoriques dans le repère de Park [V], R_s et L_s sont respectivement les résistances statoriques (Ω) et l'induction cyclique statorique (H), p et ω sont respectivement le nombre de paire de pôles de la machine synchrone et la pulsation des tensions (rad/s).

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s}.(V_{sd} - R_s \times i_{ds} + L_s \times p \times \Omega_{turbine} \times i_{sq}) \quad \text{(II.11)}$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s}.(V_{sq} - R_s \times i_{qs} + L_s \times p \times \Omega_{turbine} \times i_{sq} - K_A \times P \times \Omega_{turbine}) \quad \text{(II.12)}$$

$$C_{em} = p \times K_a \times i_{sq} \quad \text{(II.13)}$$

II.2.3 Redresseur MLI

La modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM : Pulse With Modulation en anglais),

consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable. Son objectif est d'obtenir une tension de sortie qui est proche de la sinusoïdale par le contrôle de l'évolution du rapport cyclique, et d'imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composantes alternatives d'amplitudes réduites et de fréquences élevées [23].

Les lois de modulations de largeurs d'impulsions (MLI) sont nombreuses [24]. Pour notre étude, la stratégie triangulo-sinusoidale est appliquée. Cette stratégie consiste à comparer un signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (référence) qui correspond au signal recherché. Les instants de commutations sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

Dans cette technique, un signal de référence sinusoïdal (c'est-à-dire le signal modulant) est comparé à un signal d'onde porteuse triangulaire pour générer des signaux d'impulsion de porte aux points d'intersection entre le signal de modulation et le signal de porteuse. La figure II.6 montre le principe de la génération de signaux de porte de commutation avec MLI.

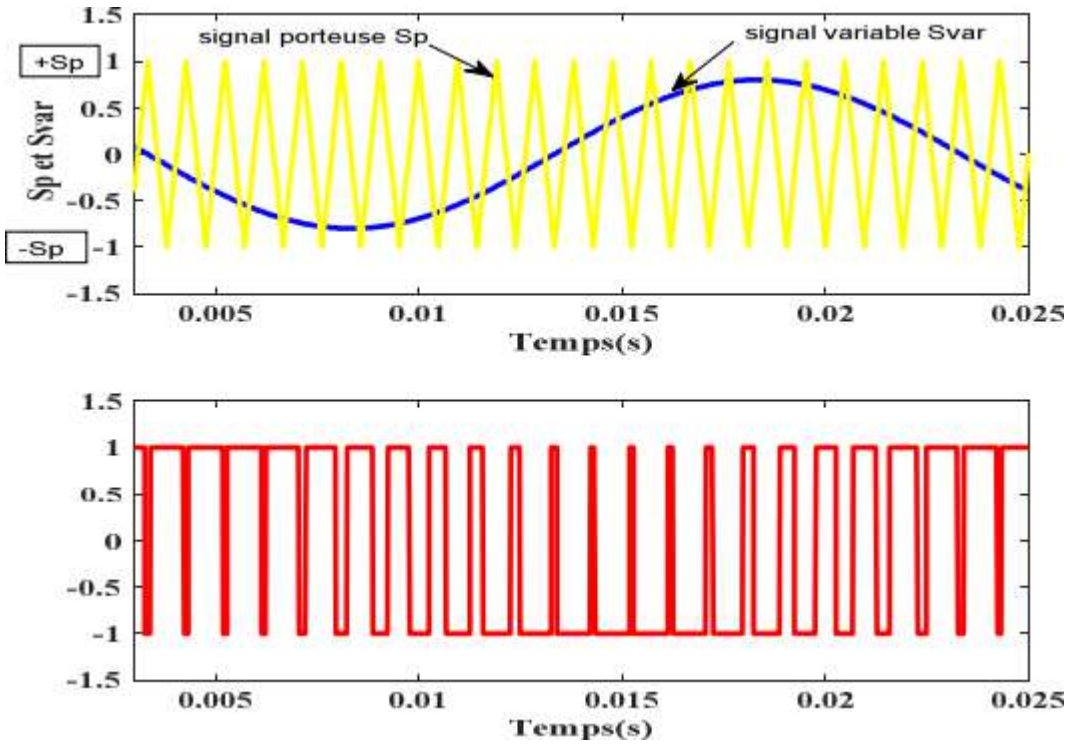


Figure II.6 : La simulation de commande MLI.

La relation entre la fréquence de porteuse à celle de la référence est donnée par m l'indice de modulation.

$$m = \frac{V_P}{V_T} \tag{II.14}$$

Où V_p est le pic de l'onde modulatrice et V_T est le pic de l'onde porteuse.

II.2.4 Convertisseur DC/AC

Un onduleur est un convertisseur statique qui convertit l'énergie type continu en énergie alternative. La forme de tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une courbe sinusoïdale (forme sinusoïdale) avec un taux d'harmoniques très faible.

Dans cette étude, on considère le cas d'un onduleur de tension à deux niveaux qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur éolien en courant alternatif (figure II.7).

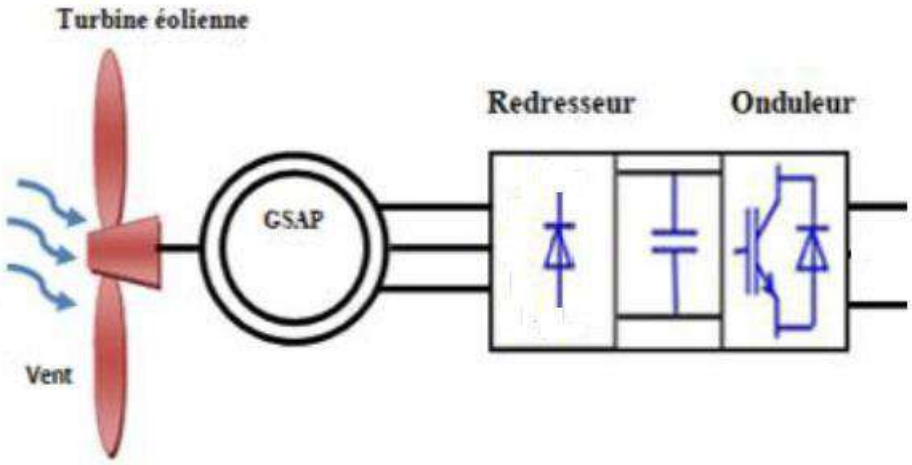


Figure II.7 : Structure du générateur éolien étudié.

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif (figure II.8). Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [25].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

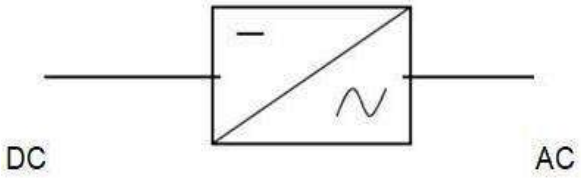


Figure II.8 : Symbole de l'onduleur.

II.2.4.1 Onduleur monophasé

Ce type d'onduleur délivre en sa sortie une tension alternative monophasée. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie à savoir :

- Onduleur monophasé en pont.

- Onduleur monophasé en demi-pont.

A. Onduleur monophasé en pont

Il est donné par la figure suivante :

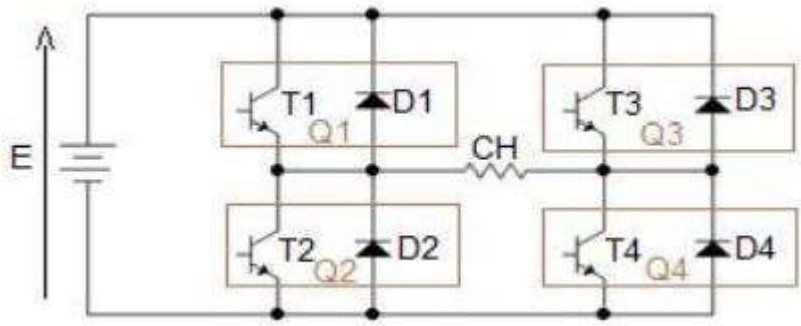


Figure II.9 : Schéma d'un onduleur en pont.

Un onduleur en pont complet contient deux bras, chaque bras est composé de deux étages d'interrupteur de puissance ; chaque étage comporte deux composants à base des S-C (Transistor /Thyristor) avec diode placées en parallèles afin d'assurer la réversibilité des courants dans la charge.

Les états des interrupteurs permettent de déterminer la valeur aux bornes de la charge :

- Pour 0< t< T/2 : Les interrupteurs Q1, Q4 sont fermés et Q2, Q3 sont ouverts :

$$U_{ch} = R * i(t) = +E \tag{II.15}$$

- Pour T /2< t< T : Les interrupteurs Q2, Q3 sont fermés et Q1, Q4 sont ouverts.

$$U_{ch} = R * i(t) = -E \tag{II.16}$$

La figure (II.10) montre les intervalles de conductions des interrupteurs dans un onduleur en pont [28] :

Q1et Q4	Q2 et Q3	Q1 et Q4	Interrupteur fermé
Q2 et Q3	Q1et Q4	Q1et Q4	Interrupteur ouvert

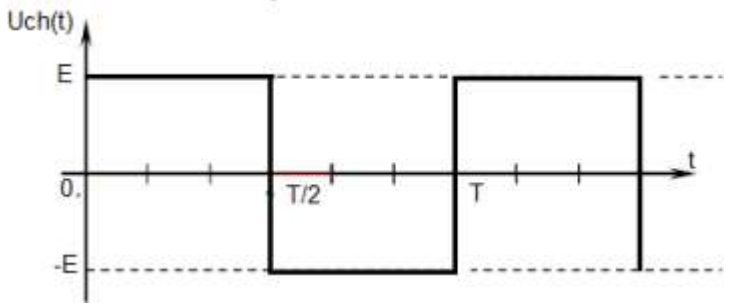


Figure II.10 : L'allure de la tension aux bornes de la charge [26].

Ci-dessous les deux figures représentent la tension et le courant au borne d'une charge résistive.

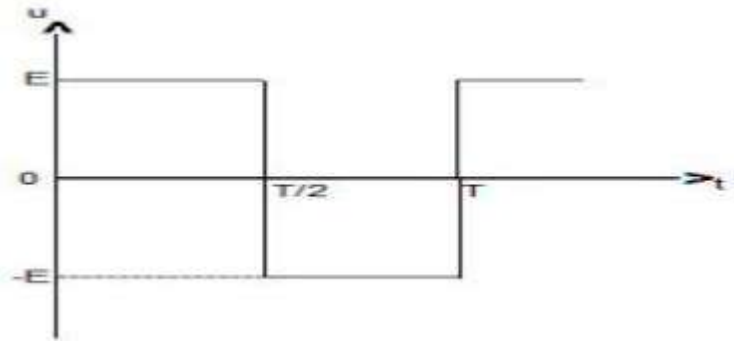


Figure II.11 : La tension aux bornes de la charge [26]

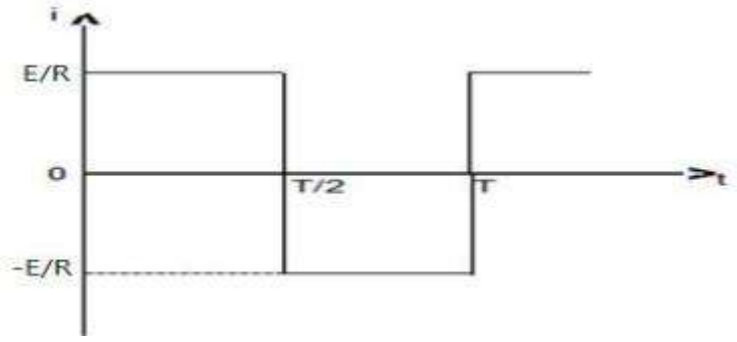


Figure II.12 : Courant d'une charge résistive [26].

- Pour 0< t< T/2 : Les interrupteurs Q1, Q4 sont fermés et Q2, Q3 sont ouverts.

$$i(t) = \frac{U_c}{R} = \frac{+E}{R} \quad \text{(II.17)}$$

- Pour T /2< t< T : Les interrupteurs Q2, Q3 sont fermés et Q1, Q4 sont ouverts.

$$i(t) = \frac{U_c}{R} = \frac{-E}{R} \quad \text{(II.18)}$$

L'allure du courant suit l'allure de tension car les deux paramètres sont liés par la loi d'Ohm. Il faut noter que le courant dans les interrupteurs est toujours positif.

La charge inductive simule un moteur alternatif et contrairement à la charge résistive l'allure de courant change [26] (Figure II.13).

- Pour $0 < t < t_1$: T1et T4 sont commandés à la fermeture tandis que T2 et T3 sont ouverts donc :

$$U_C = L\frac{di}{dt} + Ri = +E \tag{II.19}$$

D'après la figure II.13, on trouve que le courant dans cet intervalle est négatif. Ce sont les diodes D1 et D4 qui conduisent

$$i(t) = \frac{E}{R}(1 - e^{\frac{t}{\tau}}) - I_M e^{\frac{t}{\tau}} \tag{II.20}$$

Dans cet intervalle la charge fournit l'énergie vers la source « phase de restitution alternance».

- Pour $t_1 < t < \frac{T}{2}$: A l'instant t_1, le courant devient positif ce qui impose la conduction des transistors T1et T4 or les diodes D1 et D4 se bloquent. Les équations de) car on est 02-9) et (II1-(t) et i (t) restent les mêmes que (II U_c toujours dans la même maille.

On est à la « phase d'accumulation alternance » ou la charge reçoit l'énergie [26].

- Pour $\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} + t1$: T2 et T3 sont commandés à la fermeture donc

$$U_c = L\frac{di}{dt} + Ri = -E \tag{II.21}$$

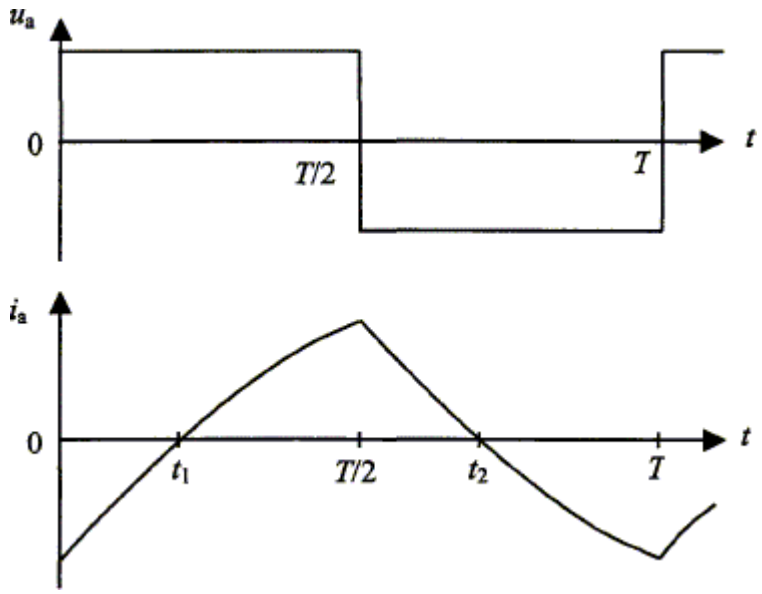


Figure II.13 : La tension et le courant aux bornes de la charge inductive.

B. Onduleur monophasé en demi- pont

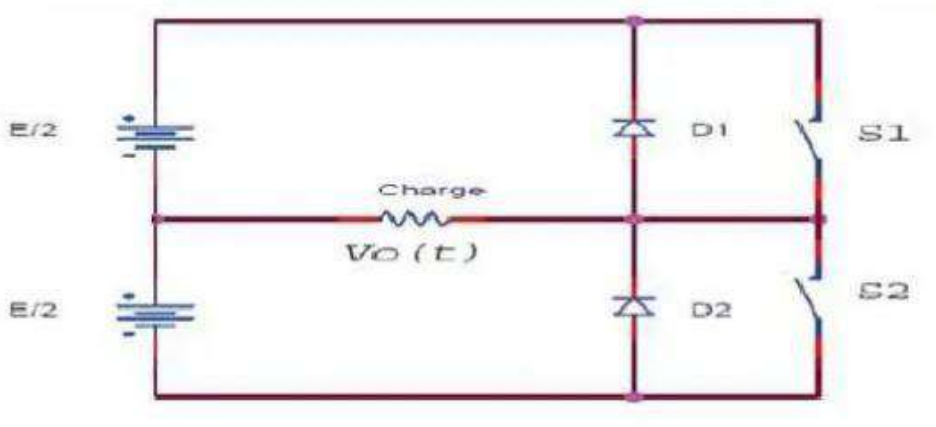


Figure II.14 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi - pont.

Il est principalement constitué de deux interrupteurs de puissance, notés S1 et S2 (figure II.14), à commande complémentaire. Le temps de marche de chaque interrupteur est d'environ une demi-période (180°) correspond à la fréquence du signal de sortie souhaité. Lorsque l'interrupteur S1 est fermé, la tension aux bornes de la charge est donc + E/2, valeur – Lorsque E/2 est le deuxième interrupteur, S2 est fermé. Les diodes D1, D2 indiquent récupération, assurant la conduction par courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge.

II.2.4.2 Onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour les applications à forte puissance. La structure de ce convertisseur est constituée de trois onduleurs monophasés demi-pont (ou pont (figure II.15)) en parallèle, fournissant trois tensions de sortie déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre.

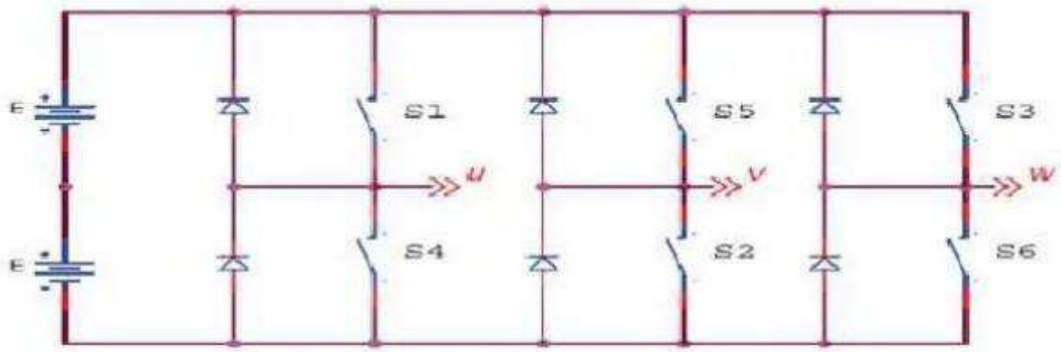


Figure II.15 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé en pont.

II.2.5 Synchronisation par PLL

Les boucles à verrouillage de phase appelées PLL (PLL = Phased Locked Loop) sont utilisées afin de connecter des sources à énergies renouvelables au réseau électrique, il faut synchroniser la tension du générateur éolien avec celle du réseau en matière de phase et de fréquence tout en contrôlant celles relatives au réseau [27].

La technologie PLL recherche un suivi de phase de réseau robuste, malgré la présence de perturbations. Les principales perturbations sont : sauts de phase, creux et surtensions, harmoniques, sauts de fréquence.

Les PLL monophasées sont soumises aux mêmes problèmes qu'en triphasé avec une difficulté supplémentaire qui tient du champ d'information plus réduit (une seule phase). Pour créer 2 signaux orthogonaux, la PLL triphasée peut utiliser la transformation de Park, mais pour la PLL monophasée, il faut rajouter un bloc ≪ Quadrature ≫ de démodulation, voir (figure II.16) [27].

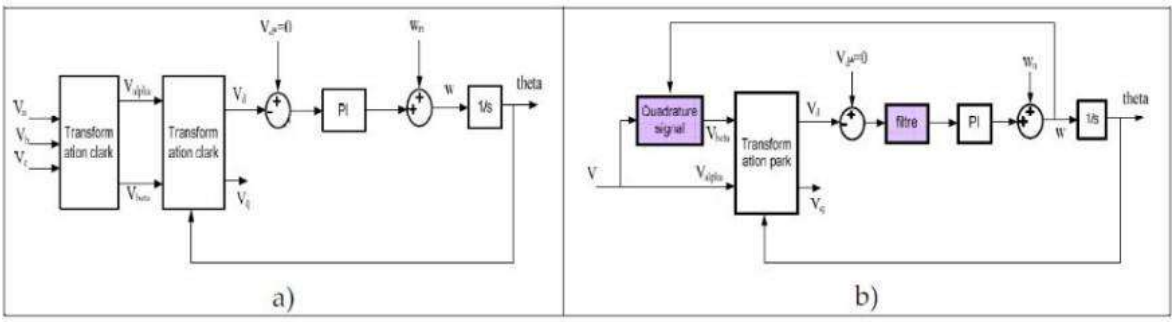


Figure II.16 : Structure de principe d'une PLL triphasée (a) et monophasée (b).

II.2.6 Filtre LCL

Le filtre LCL comprend deux inductances et un condensateur, tous connectés en parallèle, c'est-à-dire par phase. Dans les filtres LCL ci-dessus (figure II.17), Rf et Lg sont la résistanceet l'inductance côté réseau. Et Ri et Li représente l'inducteur côté onduleur. Aussi, nous avons un condensateur parallèle Cf et sa résistance de et Rd est la résistance l'amortissement passif [28].

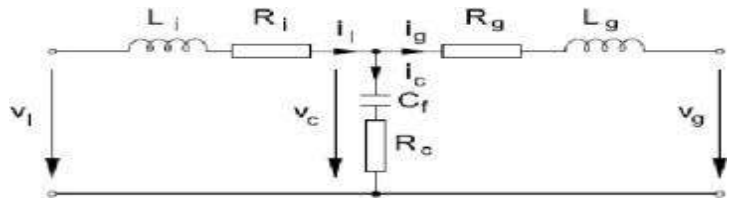


Figure II.17 : Filtre LCL.

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolien (modèles de la turbine, de la machine synchrone à aimants permanents et du redresseur MLI). Nous avons également introduit le modèle des convertisseurs statiques DC/AC. Dans le chapitre qui suit nous présenterons les techniques MPPTs, du système de conversion éolien.

Chapitre III:
TECHNIQUES MPPT

III.1 Introduction

Le moyen le plus économique d'améliorer les performances des générateurs éoliens est de les maintenir en fonctionnement à leur point de puissance maximal quelles que soient les conditions environnementales. Ceci peut être réalisé en associant un contrôleur *MPPT* au convertisseur électronique de puissance. Un grand travail a été fait pour améliorer les performances des systèmes éoliens à travers le développement des $MPPTs$. Dans ce chapitre, une tentative est faite pour revoir les méthodes *MPPTs* les plus récentes [29].

III.2 Poursuite du point de puissance maximale

La commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » est une méthode qui permet au générateur éolien de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques (vitesse du vent) [30].

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique de la tension Vref du régulateur du bus continu de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du système éolien [29] (Figure III.1).

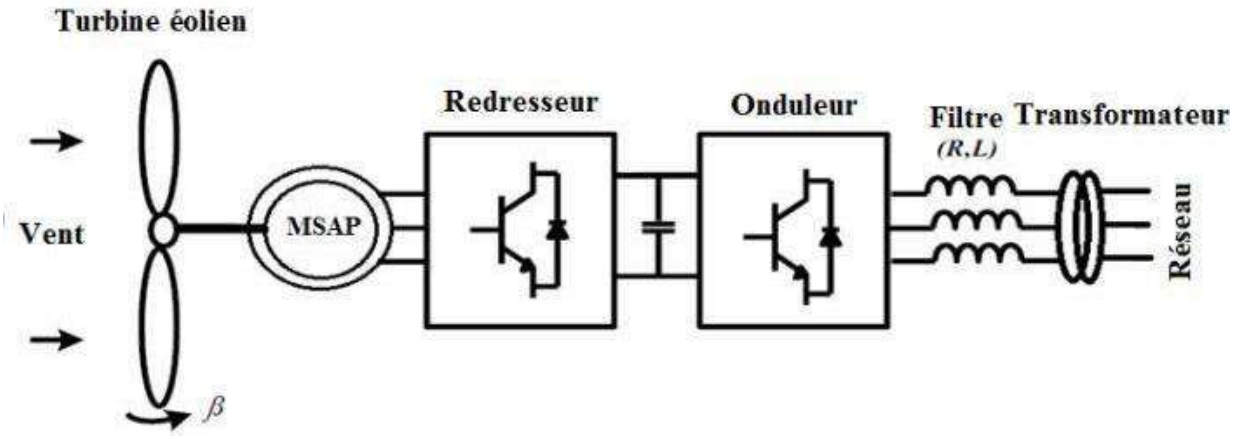


Figure III.1 : Modélisation du système éolien connectée au réseau via deux convertisseurs (redresseur et onduleur).

Les régulateurs MPPT sont utilisés afin d'extraire le maximum de puissance d'un système éolien. Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre ; d'autres critères utiliser pour évaluer la qualité de ce type de commande tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de changement des conditions météorologiques (vitesse du vent) et le matériel nécessaire pour la mise en œuvre. [30].

III.3 Classification des techniques MPPT

La première technique *MPPT* a été utilisé dans les années 1970 pour des applications aéronautiques **[31],** par la compagnie « *Honeywell »* et le centre de recherche « *NASA »*. Depuis, de nombreuses techniques *MPPT* ont été développées et utilisées comme indiqué sur la Figure (III.2).

Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système éolien

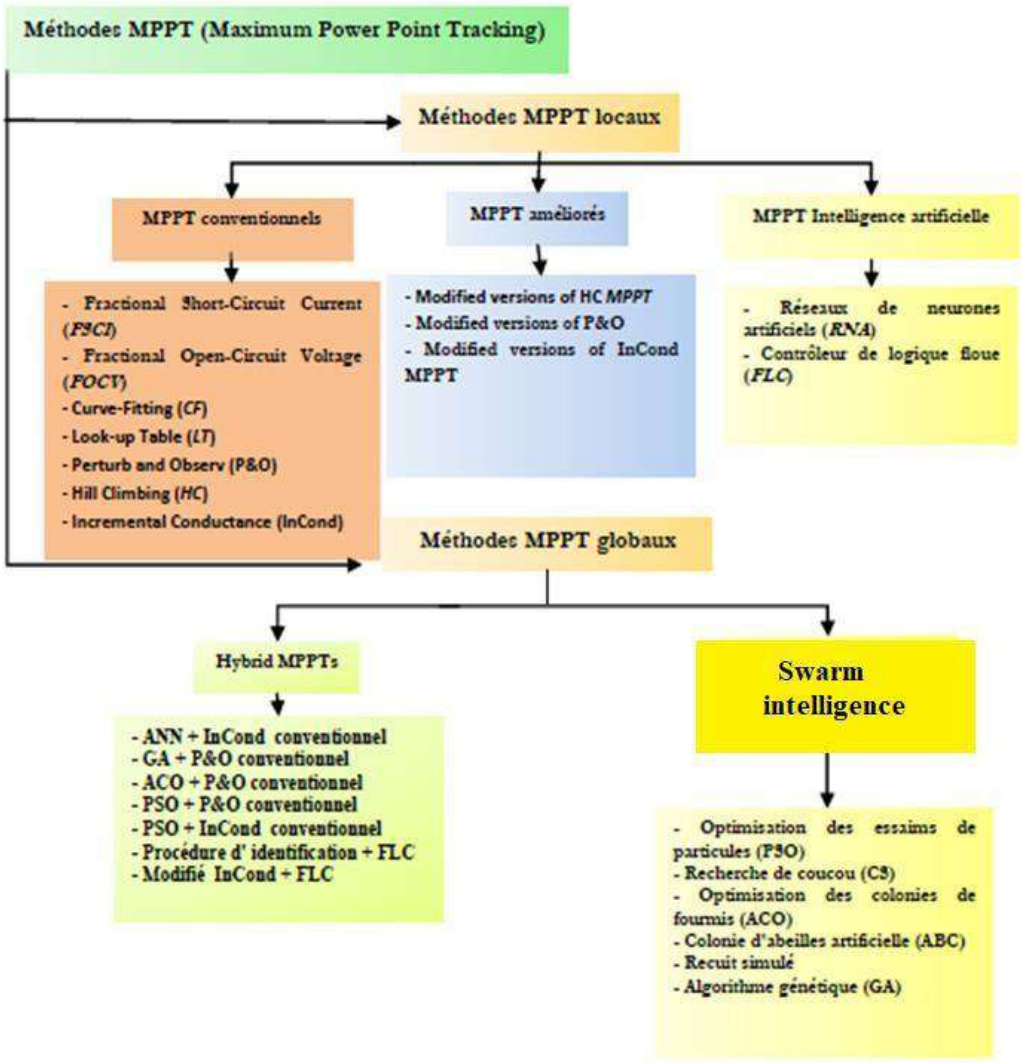


Figure III.2 : Classification des techniques MPPT [29].

III.3.1 Techniques de recherche du point de puissance maximal local

Parmi les Techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT locaux (classique) on trouve :

- MPPTs classiques
- MPPTs d'intelligences artificielles

III.3.1.1 MPPTs classiques

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPTs classiques. Les plus utilisés sont:

- Méthode de perturbation et observation (P&O).

- Méthode de conductance Incrémentale (InCond).
- Méthode de la montée colline (Hill climb).

A. La technique Perturbation & Observation (P&O)

L'algorithme P&O consiste à modifier le point de fonctionnement du module éolien, en augmentant ou diminuant la tension de référence Vref et de mesurer la puissance de sortie avant et après la perturbation. Si la puissance augmente, l'algorithme perturbe le système dans le même sens. Sinon, le système est perturbé dans la direction opposée. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du système éolien [32].

Figure III.3 montre les 4 options possibles présentées lors du suivi du MPP, le point 1 étant la position précédente et le point 2 la position actuelle de chaque cas (A, B, C et D).

- Cas A **:** $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$
- Cas B **:** $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$
- Cas C **:** $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$
- Cas D **:** $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$

Dans les cas A et C, la tension *Vref* doit diminuer, entraînant une augmentation de la tension du système éolien.

Alors que dans les cas B et D, la tension *Vref* doit être augmenté de façon à ce que tension du système éolien diminue.

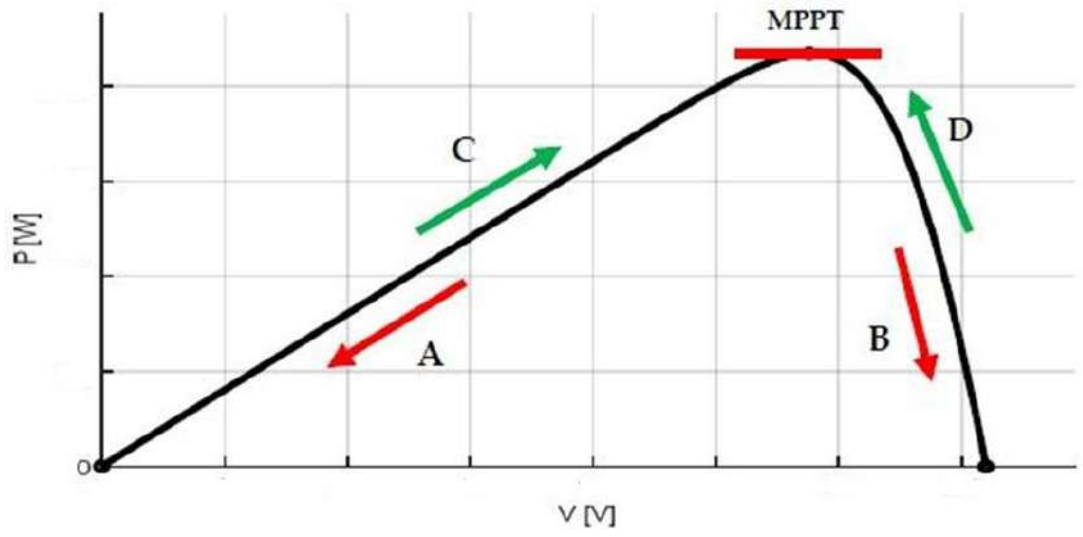


Figure III.3 : Le fonctionnement de l'algorithme P&O [33].

L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(k) = V(k-1)+\Delta V \ \text{sign}\left(\frac{dP}{dV}\Big|_{V=V_{n-1}}\right) \qquad \textbf{(III.2)}$$

Tableau III.1. Tableau de vérité de l'algorithme « Perturbation & observation »[33].

Perturbation de la puissance	Observation de la puissance	Prochaine perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative(-)	Négative (-)	Positive (+)

L'organigramme mis en œuvre pour le régulateur P&O est présenté par la Figure suivante :

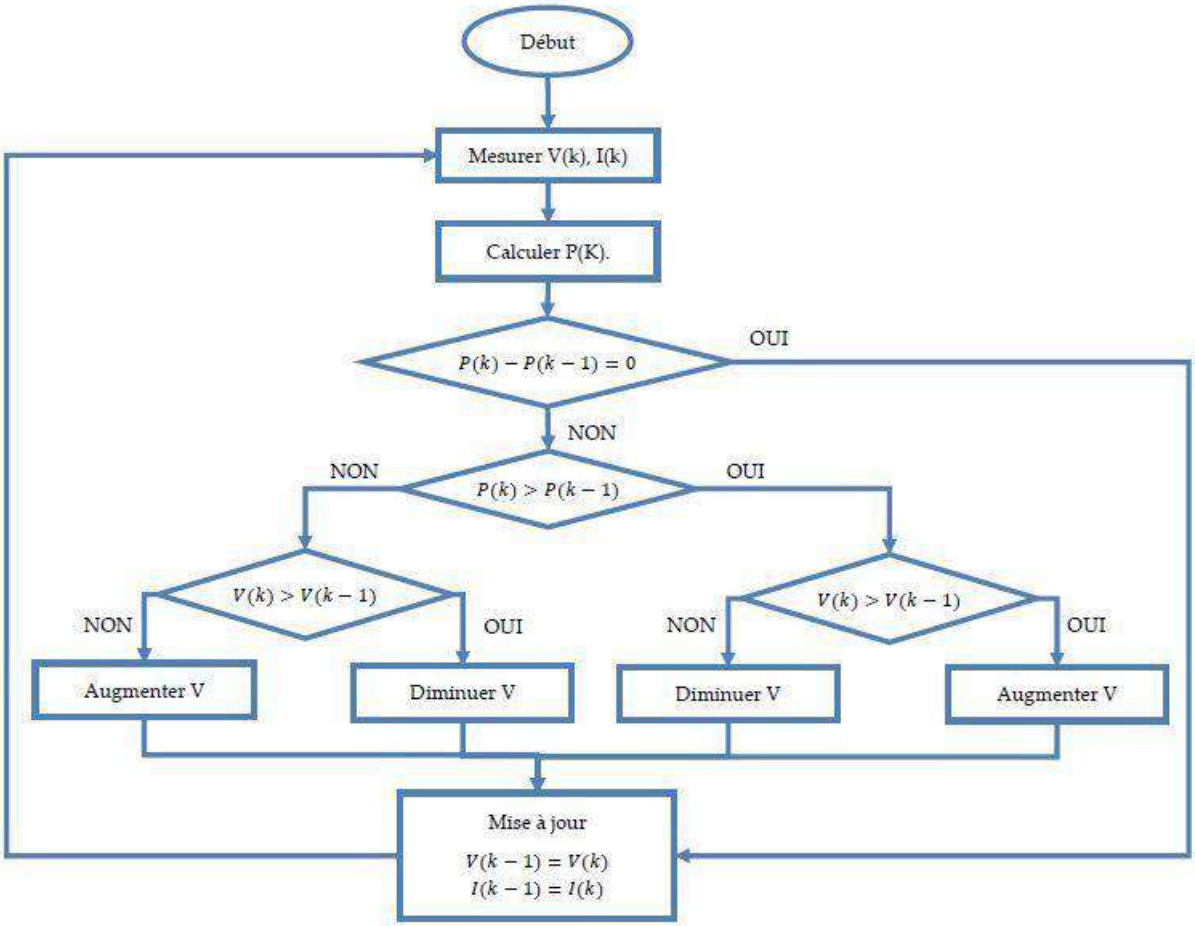


Figure III.4 : Organigramme de la méthode P&O.

B. La technique d'Incrémental Conductance (InCond)

Dans la méthode de la conductance incrémentielle, la tension aux bornes de l'éolienne est toujours ajustée en fonction de la tension MPP. Elle est basée sur la conductance incrémentielle et instantanée [33].

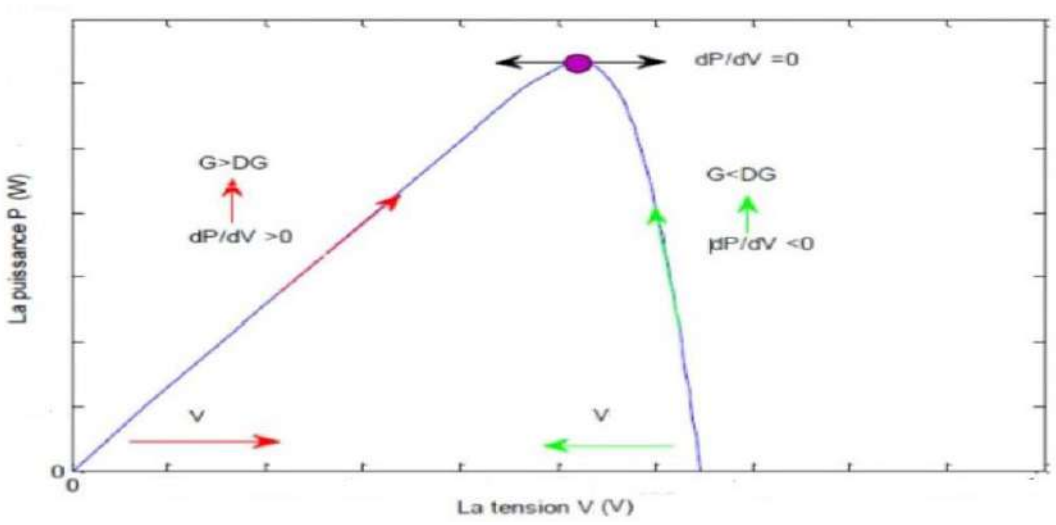


Figure III.5 : Principe de la méthode InCond.

Nous allons chercher le maximum de point d'annulation de la dérivée de puissance (comme indique sur de la figure III.5), en comparant la conductance **G** à la conductance incrémentielle **ΔG**.
En effet, la puissance de la sortie de la source peut s'écrire :

$$P=V.I \qquad \textbf{(III.3)}$$

D'où en écrivant la dérivée :

$$\frac{dP}{dV}=\frac{VdI}{dV}+\frac{dV}{dV}.\,I \qquad \textbf{(III.4)}$$

$$\frac{dP}{dV}=\frac{VdI}{dV}+1.\,I \qquad \textbf{(III.5)}$$

$$\frac{dP}{dV}\cong V\frac{\Delta}{\Delta V}+I \qquad \textbf{(III.6)}$$

Donc :

$\frac{dP}{} = 0$ $\qquad$ $\frac{\Delta}{} = -\,I$ $\qquad (a)$ Au point du MPP

dV ΔV $\overline{V}$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{OU} \quad \frac{\Delta I}{V} > -\frac{I}{V} \quad (b) \text{ A gauche du MPP} \qquad \textbf{(III.7)}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad (c) \text{ A droite du MPP}$$

Les deux équations (b) et (c) sont employées pour déterminer la direction du point de fonctionnement MPP dans laquelle la perturbation se produit, elle se répète jusqu'à ce que l'équation (a) soit satisfaite.
À partir des équations (III.7), l'algorithme InCond peut être représenté par l'organigramme suivant :

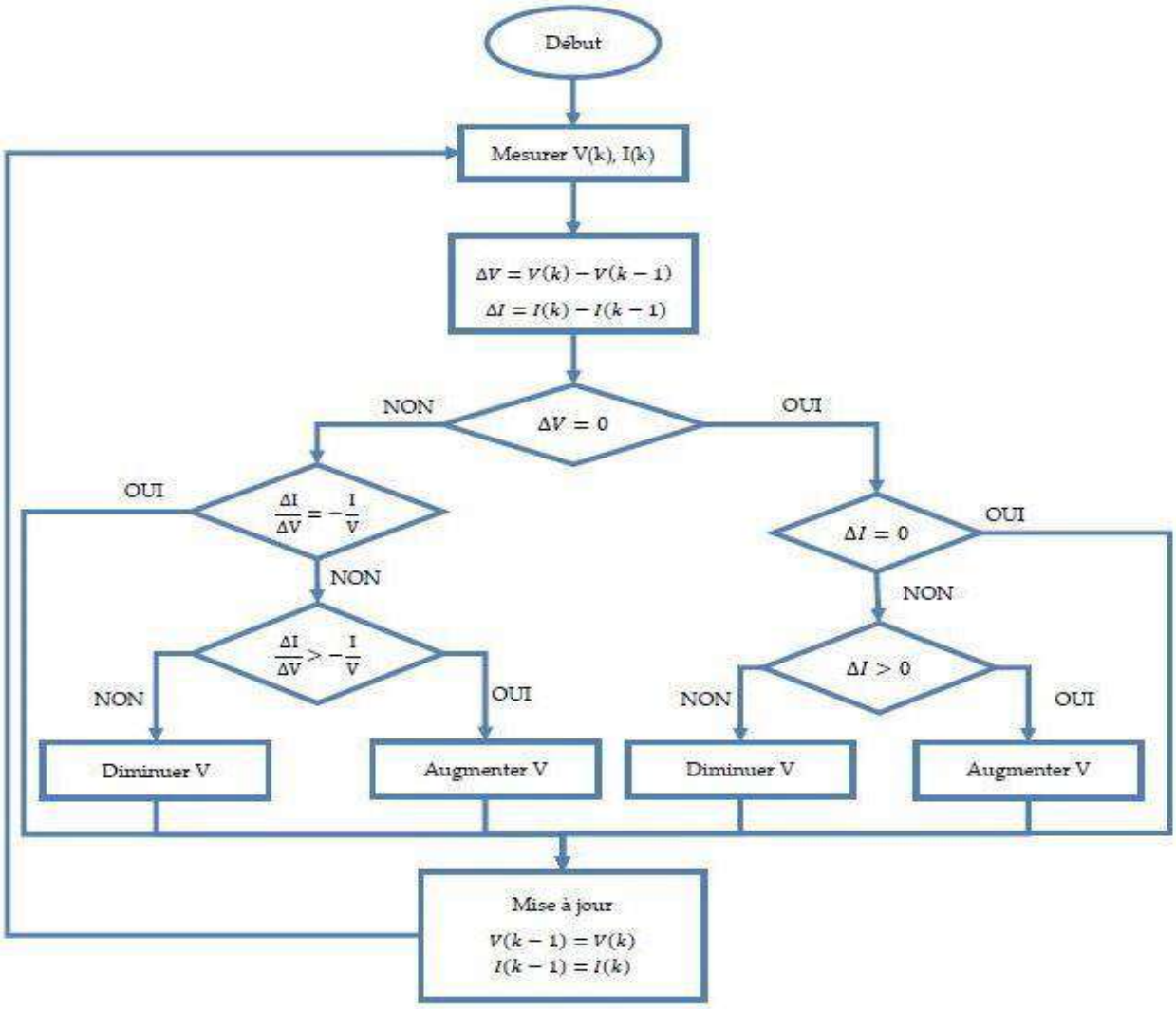


Figure III.6 : Organigramme de la méthode InCond

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme P&O puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteinte le point MPP.

C. La technique de l'escalade de la colline (Hill climb)

La technique Hill Climbing [34, 35] est une méthode mathématique d'optimisation. Comme son nom l'indique, elle fait monter le point de fonctionnement le long d'une caractéristique pour atteindre le maximum de la fonction puissance du système eolien (Figure III.7). La perturbation est appliquée pour plusieurs itérations sur le paramètre $Vref$ en l'incrémentant ou en le décrémentant de ΔVref jusqu'à avoir la dérivée dP/d$Vref$ nulle. La Figure III.8 présente l'algorithme d'exécution de cette technique. La méthode Hill climb est plus simple à mise en œuvre car elle possède une seule boucle de régulation. Cependant, elle présente des oscillations et peut même diverger lors du changement rapide des conditions atmosphériques.

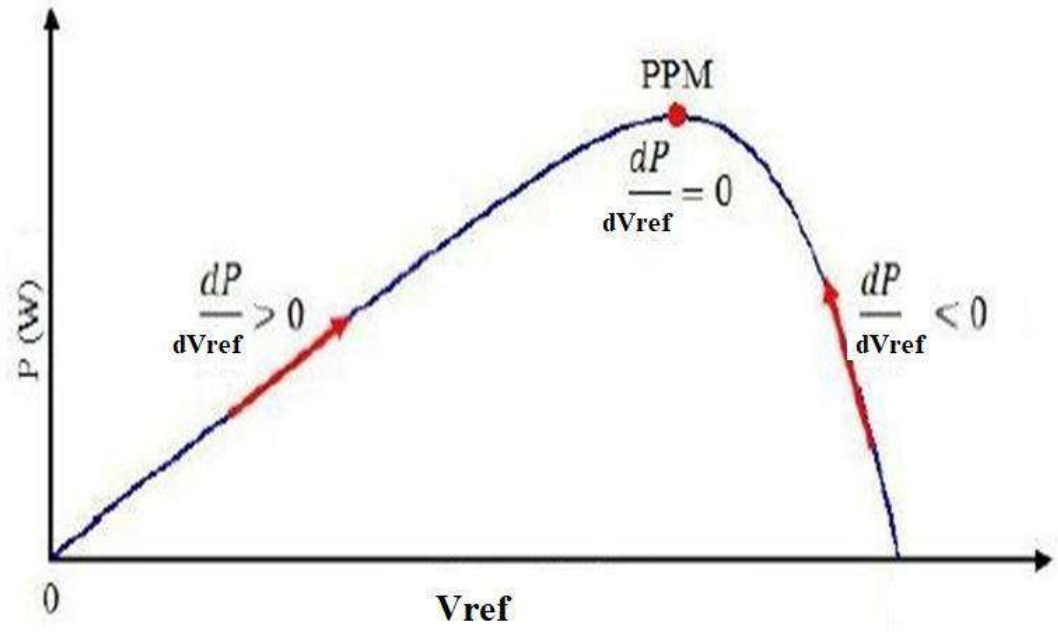


Figure III.7 : Principe de la méthode Hill climb.

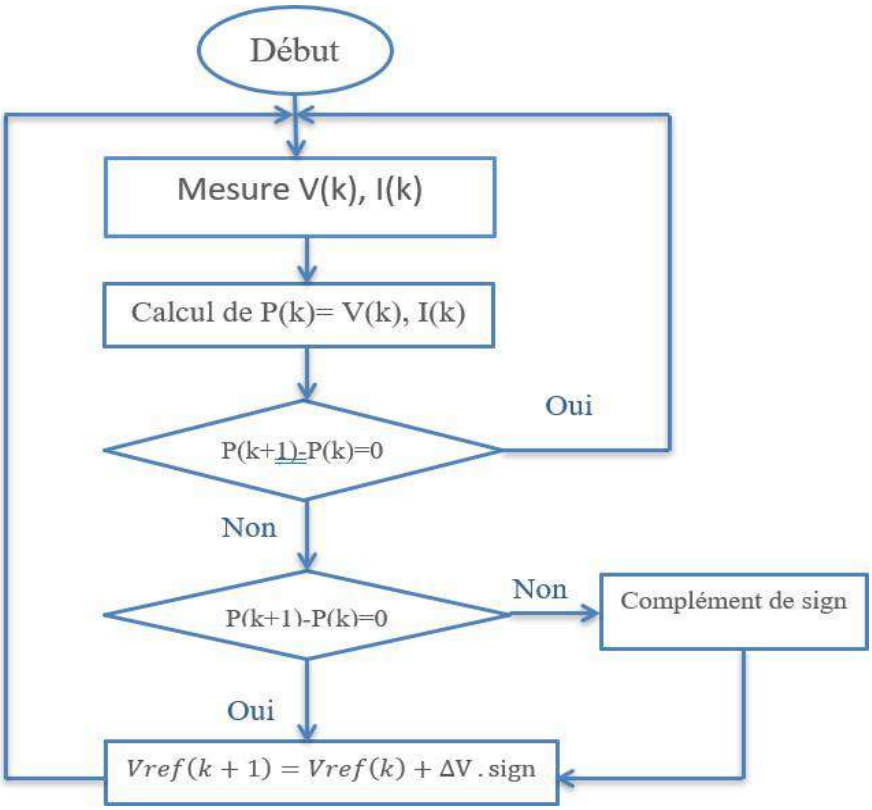


Figure III.8 : Algorithme de la méthode Hill climb.

III.3.1.2 MPPT d'intelligences artificielles

L'intégration des techniques d'intelligence artificielle pour le contrôle est la nouvelle tendance des travaux de recherche dans les applications d'énergie renouvelable. Ces techniques améliorent l'efficacité des différents systèmes de production d'énergie, spécialement, dans le domaine des systèmes photovoltaïques et éolien **[36].**

A. Réseaux de neurones artificiels (RNA)

RNA est une interconnexion de neurones artificiels (nœuds) qui imitent un cerveau biologique **[37].** Une structure possible d'RNA, adaptée au MPPT, est illustrée à la figure III.9**.** Il comprend une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Dans chaque couche, le nombre de nœuds varie et il est défini par l'utilisateur. Le lien entre les i *ème* et j *ème* nœuds est le poids *wij*. De nombreux paramètres mesurés liés au système éolien peuvent être utilisé, comme la tension de sortie, le courant de sortie, les données environnementales telle la vitesse du vent, ou toute combinaison, peuvent être utilisés comme entrées pour RNA MPPT.

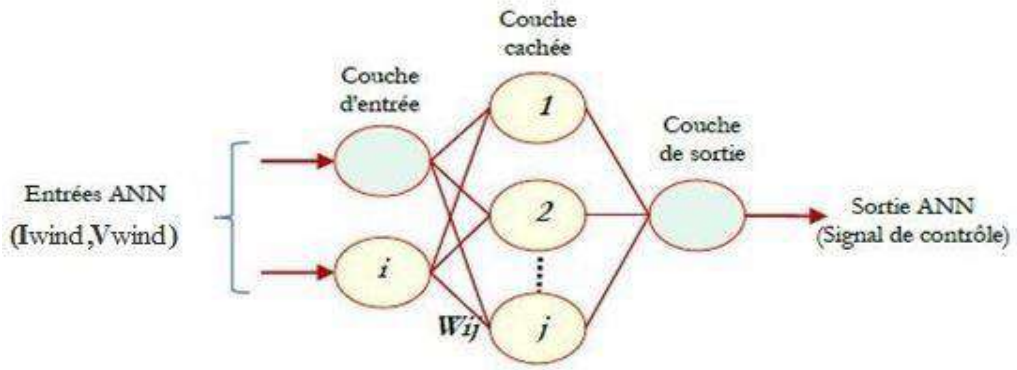


Figure III.9 : Une structure ANN typique pour MPPT.

Les Réseaux de neurones entraînés est utilisés pour trouver la solution Vref. Il est à noter que la haute performance d'un RNA dans le suivi du MPP dépend fortement de la couche cachée et de la rigueur et de l'étendue de l'entraînement de ses réseaux **[37].**

B. Commande MPPT par la logique floue

La mise en œuvre de la commande logique floue (Fuzzy Logic Control) se fait en trois étapes : la fuzzification, la lecture de la table de vérité et la défuzzification. Les variables d'entrées sont généralement l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et la variable de sortie est la tension de référence ΔVref. En particulier, dans le cas de la poursuite du PPM, l'erreur E et le changement d'erreur ΔE sont calculés en fonction des valeurs instantanées de la puissance et de la tension comme suit [38].

$$\mathbf{E(n)} = \frac{\mathbf{P(n)-P(n-1)}}{\mathbf{V(n)-V(n-1)}} \qquad \textbf{(III.8)}$$

$$\mathbf{\Delta E(n)} = \boldsymbol{E(n) - E(n-1)} \qquad \textbf{(III.9)}$$

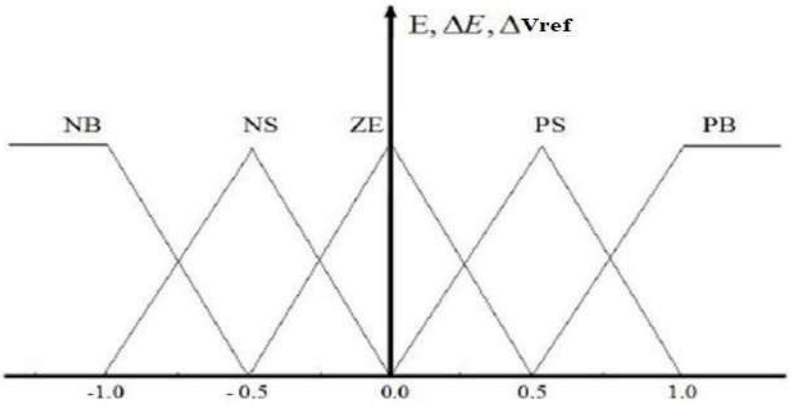


Figure III.10 : Structure de base de la commande floue.

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variables linguistiques pouvant prendre les cinq valeurs suivantes (Figure III.10): NB (Négative Big), NS (Négative Small), ZE (Zéro), PS (Positive Small), PB (Positive Big). Il existe des commandes qui ajoutent aux valeurs précédentes deux autres valeurs qui sont : NM (Négative Means) et PM (Positive Means) [39].

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le Tableau III.2, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta Vref$.

Tableau III.2 : Exemple d'une table de règles pour une commande logique floue [39]

E \ ΔE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

III.3.2 Techniques de recherche du point de puissance maximal global (MPPT avec la technique d'optimisation par essaims des particulaires)

Les techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT globaux sont des techniques qui se basent sur l'intelligence d'essaim. Ce sont des méthodes d'optimisations métaheuristiques. Ces algorithmes sont de la famille d'algorithmes stochastiques destinés à résoudre des problèmes d'optimisation "difficile". Utilisées dans de nombreux domaines, ces méthodes présentent l'avantage d'être généralement efficaces, sans pour autant que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme qu'il utilise [29].

Dans cette partie, on s'intéresse plus particulièrement à la technique d'optimisation de l'essaim de particules (Particle Swarm Optimization (PSO))

Dans la recherche du point de puissance maximale on peut prendre la tension de référence Vref à la place de la position de la particule *x*, la variation de la tension de référence ΔVref comme étant la vitesse du déplacement *v*, et la fonction fitness étant la puissance correspondante à chaque tension de référence, [29] en résumé :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{Vref_i} &= \boldsymbol{x_i} \\ \boldsymbol{\Delta Vref_i} &= \boldsymbol{V_i} \\ \boldsymbol{P_{op-i}} &= \boldsymbol{D_{op-i}} \\ \boldsymbol{P_{op-g}} &= \boldsymbol{D_{op-g}} \\ \boldsymbol{F(x)} &= \boldsymbol{P(Vref)} \end{aligned} \qquad \textbf{(III.10)}$$

Les équations (**III.10)** et (**III.11)** deviennent :

$$\boldsymbol{Vref_i(t+1) = Vref_i(t) + \Delta Vref_i(t+1)\ ,\ i \in \{1, \ldots\ldots n_p\}} \qquad \textbf{(III.11)}$$

$$\boldsymbol{\Delta Vref_i(t+1) = w\Delta Vref_i(t) + c_1 r_1 (Vref_{op_i} - Vref_i(t)) + c_2 r_2 (Vref_{op_g} - Vref_i(t))} \qquad \textbf{(III.12)}$$

Vref $_i$ (t+1) : La tension de référence de la particule *i* à l'instant (t+1) ;
V_i (t) : La tension de référence de la particule *i* à l'instant (t) ;
ΔV_i (t+1) : La variation de la tension de référence de la particule *i* à l'instant (t+1) ;
ΔV_i (t): La variation de la tension de référence de la particule *i* à l'instant (t);
Vre fop_i: La meilleur tension de référence de la particule *i* ;
Vrefop_g: La meilleur tension de référence global (de toutes les particules de l'essaim).

A chaque itération, on détermine la puissance correspondante à la position de chaque particule de l'essaim, on définit alors la fonction Objectif « Fitness » qui donne le poids de chaque tension de référence (position d'une particule), la position est meilleure si la puissance correspondante est supérieure,[33] on peut donc écrire :

Si : $\boldsymbol{P(Vref_i(t+1)) > P(Vref_{op_i}) \Rightarrow Vref_{op_i} = Vref_i(t+1)}$ **(III.13)**

Si : $\boldsymbol{P(Vref_i(t+1)) > P(Vref_{op_g}) \Rightarrow Vref_{op_g} = Vref_i(t+1)}$ **(III.14)**

L'organigramme de la Figure III.11 donne les étapes de la poursuite du PPM avec PSO.

- ✓ **Étape 1:** Initialisation de l'algorithme.

  Les particules (les valeurs initiales de Vref et ΔVref) sont générées d'une façon aléatoire sur l'espace de travail (nombre de particules $\boldsymbol{np}$ de l'essaim).

Les constantes d'optimisation (***w, c1, c2, r1, r2***) sont aussi définies dans cette étape, ces constantes définissent le comportement de l'évolution de l'algorithme et nécessitent une bonne connaissance du système [29].

- ✓ **Étape 2:** Évaluation des particules.

  Chaque tension de référence est appliqué au régulateur du bus continu, la tension et le courant correspondants seront récupérés et la puissance de chaque particule est calculée [40].Cette puissance est plus grande pour la tension de référence optimale.

- ✓ **Étape 3:** Mettre à jour la position optimale locale et globale.

  Si le la tension de référence d'une particule donne la meilleure puissance de son parcours alors cette la tension de référence sera enregistré entant que l'optimum local Vref$_{op_i}$, et s'il donne la plus grande puissance que celles obtenues par les autres particules alors il devient l'optimum global Vref$_{op_g}$, équations (III.13) et (III.14).

- ✓ **Étape 4 :** Mettre à jour ***Vref*** et ΔVref.

  Si le critère d'arrêt est satisfait alors le meilleur rapport cyclique Vref$_{op_g}$ est utilisé sinon une optimisation de Vref et ΔVref, de toutes les particules, est appliquée en utilisant les équations (III.13) et (III.14). S'il n'y a pas de changement dans la vitesse du vent, le PPM ne change pas, il est donc inutile de perturber le système d'une manière continue à la recherche d'un nouveau PPM, pour cela un étage est inséré dans le logigramme pour tester le changement dans de la vitesse du vent [29]

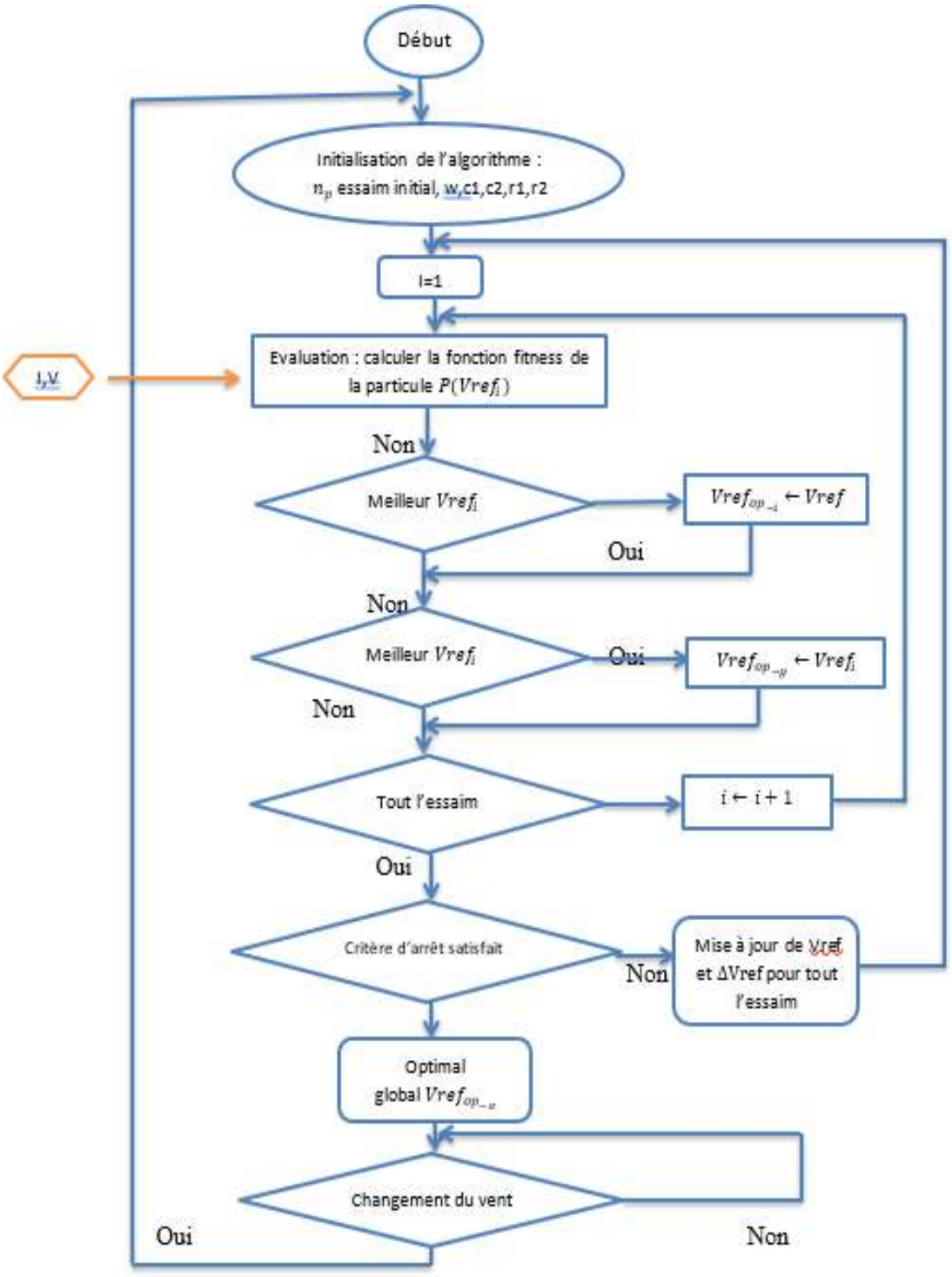


Figure III.11 : Organigramme de la MPPT par PSO [29].

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté différentes techniques pour la poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale. Nous avons commencé par les méthodes classiques (P&O, InCond et Hill climb). On a présenté également leurs organigrammes. Ensuite, on a cité deux techniques de l'intelligence artificielles à savoir le réseau de neurone et la logique flou. Ces déférents techniques sont classées autant que techniques de recherche du point de puissance local.

Comme technique de recherche du point de puissance maximal global, on a présenté l'algorithme PSO. Ce dernier sera utilisé dans le chapitre suivant, qui présentera les résultats de la commande MPPT se basant sur la technique PSO afin d'optimiser la puissance d'un système éolien résidentiel connecté au réseau électrique.

CHAPITRE IV :

Résultat de simulation d'un system éolien Connecté au réseau

IV.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les résultats de simulation de la technique de commande MPPT se basant sur algorithme PSO cité dans le chapitre précédent. Les résultats obtenus ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

IV.2 Introduction à MATLAB

- MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple.
- Avec ses fonctions spécialisées, MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques.
- MATLAB est un interpréteur : les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne.
- MATLAB fonctionne dans plusieurs environnements tels que X-Windows, Windows, Macintosh.

Il existe deux modes de fonctionnement :

IV.2.1 Mode interactif : MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'usager [41].

IV.2.2 Mode exécutif : MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage MATLAB) [41].

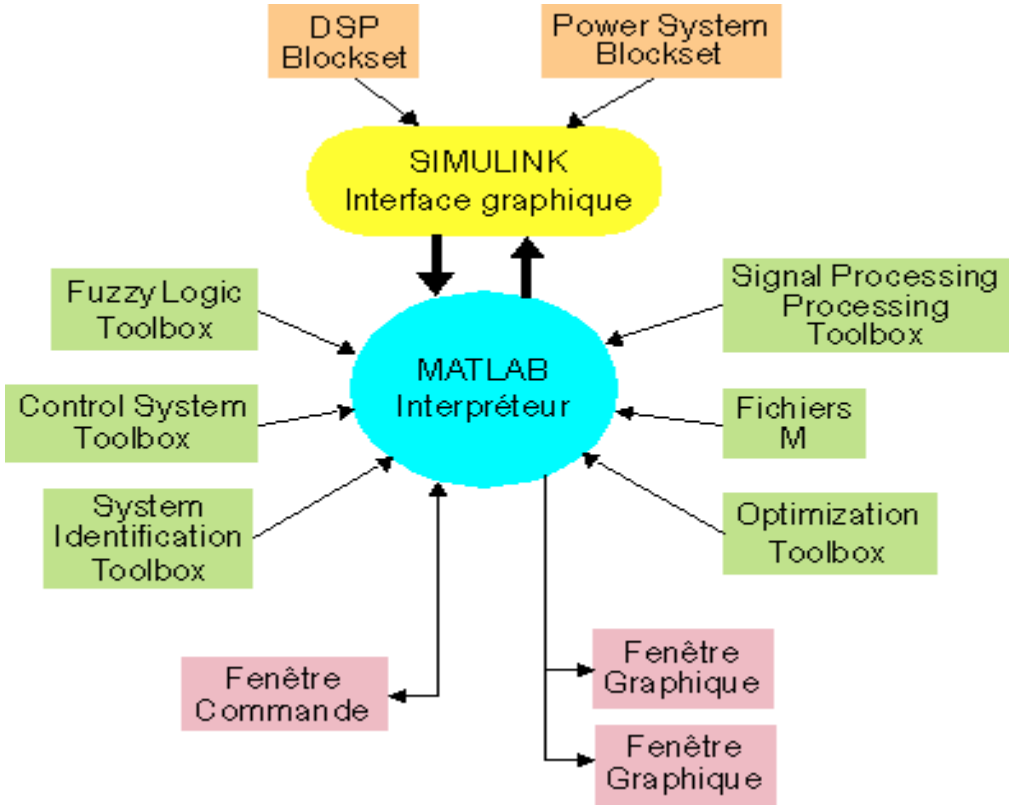


Figure IV.1 : Environnement MATLAB [41].

Dans l'environnement MATLAB on trouve :

- Fenêtre Commande : Dans cette fenêtre, l'usager donne les instructions et MATLAB retourne les résultats.
- Fenêtres Graphique: MATLAB trace les graphiques dans ces fenêtres.
- Fichiers M: Ce sont des programmes en langage MATLAB (écrits par l'usager).
- Toolboxes: Ce sont des collections de fichiers M développés pour des domaines d'application spécifiques (Signal Processing Toolbox, System Identification Toolbox, Control System Toolbox, u-Synthesis and Analysis Toolbox, Robust Control Toolbox, Optimization Toolbox, Neural Network Toolbox, Spline Toolbox, Chemometrics Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, etc.)
- Simulink: C'est l'extension graphique de MATLAB permettant de travailler avec des diagrammes en blocs.
- Blocksets: Ce sont des collections de blocs Simulink développés pour des domaines d'application spécifiques (DSP Blockset, Power System Blockset, etc.) [41].

IV.3 Les régulateurs de l'onduleur monophasé en pont

La commande de cet onduleur est mise en œuvre par trois régulateurs (Figure IV.2)

- Le régulateur MPPT à base de l'algorithme d'optimisation PSO. Ce dernier fournit la tension V_{dcref}
- Le régulateur de la tension du bus continu Vdc. La sortie de ce régulateur est le courant de référence I_{dcref}
- Les régulateurs des composants active et réactive des courants Id et Iq.
- La référence du courant I_q est fixée à zéro, afin de maintenir le facteur de puissance à

  1. Les sorties de tension V_d et V_q du régulateur de courant sont converties en 2

  signaux de modulation Uref utilisés par le générateur d'impulsions MLI (PWM).

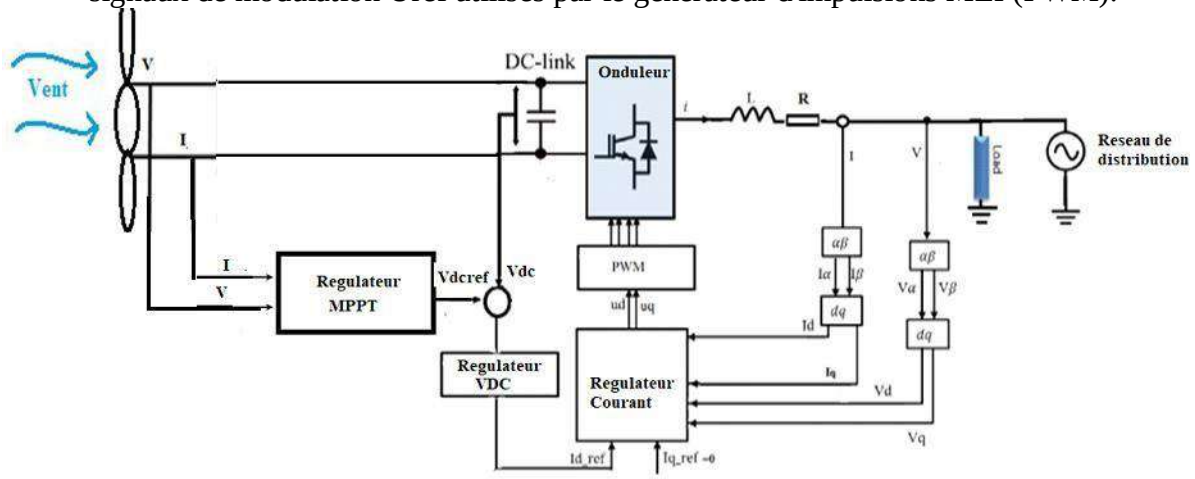


Figure IV.2 : Schéma de commande de l'onduleur.

IV.4 Simulations

Nous avons utilisé deux profils de vitesse de vent et ceci dans le but de tester les performances de la commande proposée

IV.4 .1 Le premier profil

Des profils de vitesse du vent rectangulaires ont été adoptés, le premier profil de vitesse varie d'un minimum de 8 m/s à un maximum de 11 m/s (Figure IV.3)

IV.4 .1.1 Performance du système coté source

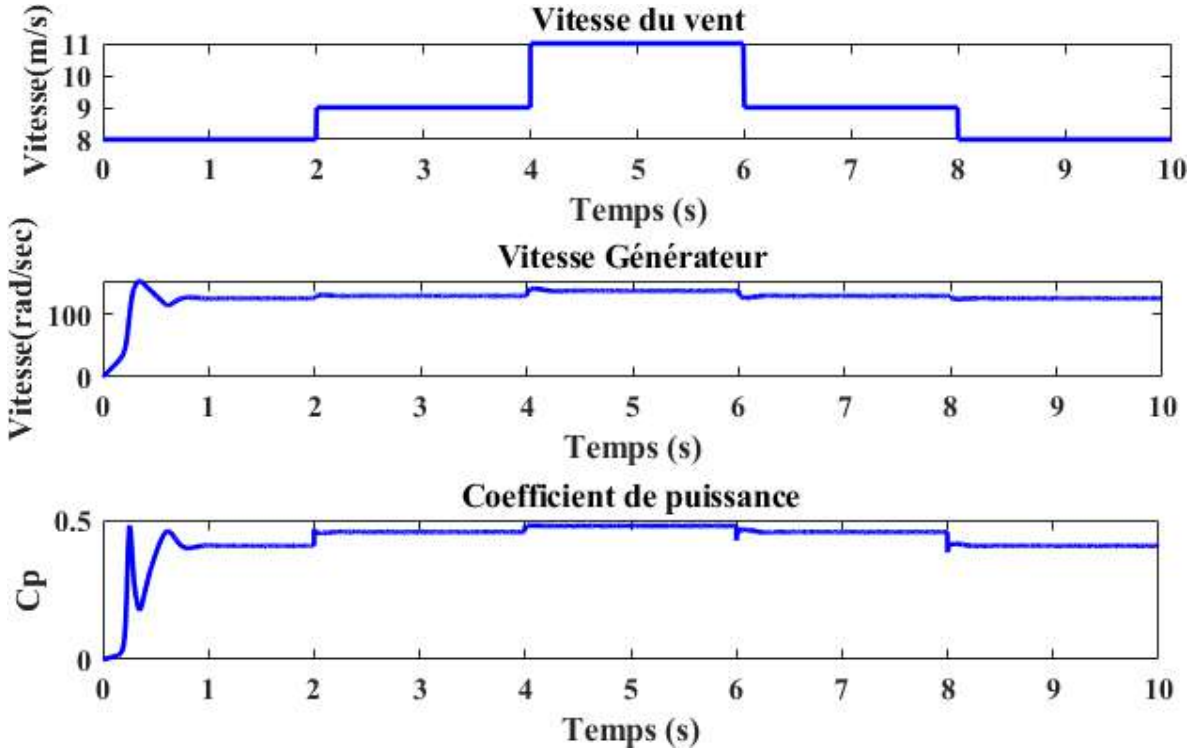


Figure IV.3 : Vitesse du vent, vitesse du rotor, coefficient de puissance pour le premier profil de la vitesse du vent.

Les résultats de la vitesse du rotor et du coefficient de puissance sont illustrés à la Fig.IV.3. La vitesse du générateur augmente de 0 (rad/sec) à 150 (rad/sec) sur un intervalle de [0s – 0.35s]. On remarque que la vitesse du rotor varie avec la vitesse du vent.

Il est clair d'après la figure VI.3 que le coefficient de puissance varie aussi avec la vitesse du vent.

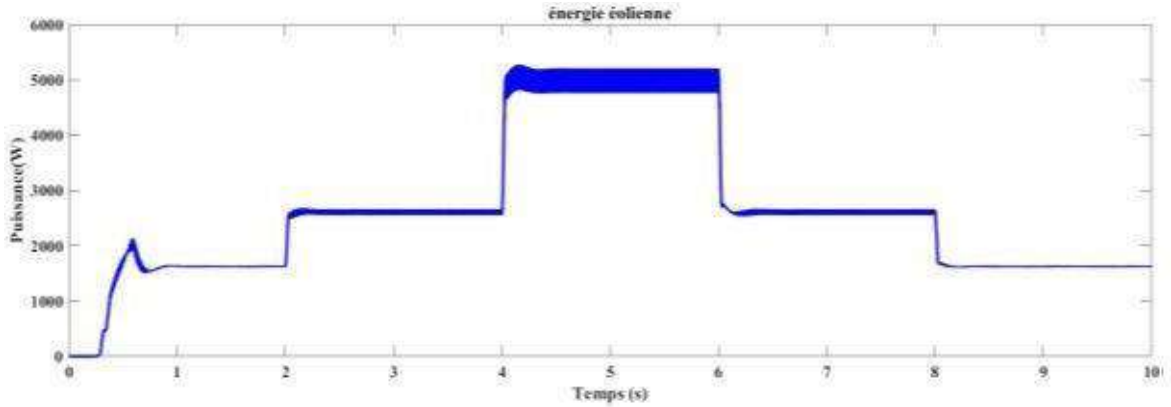


Figure IV.4 : La puissance générée par le système éolien.

D'après la figure IV.4, la puissance varie suivant le changement enregistré de la vitesse du vent.

IV.4 .1.2 Performance du système coté bus continu

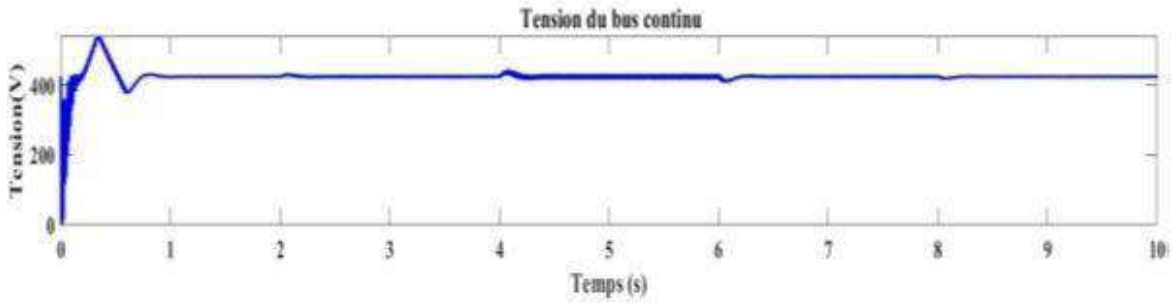


Figure IV.5 : Performance de la tension du bus continu.

La tension du bus continu augmente de 0V jusqu'à 450V dans l'intervalle [0s-0.3s] puis elle varie suivant la variation de la vitesse du vent (figure IV.5).

IV.4 .1.3 Performance du système coté charge

Les courbes des courants et tensions se rapprochent de la forme sinusoïdale, comme il est illustré sur la Figure IV.6. Le courant injecté à la charge dépende très fortement de la vitesse du vent.

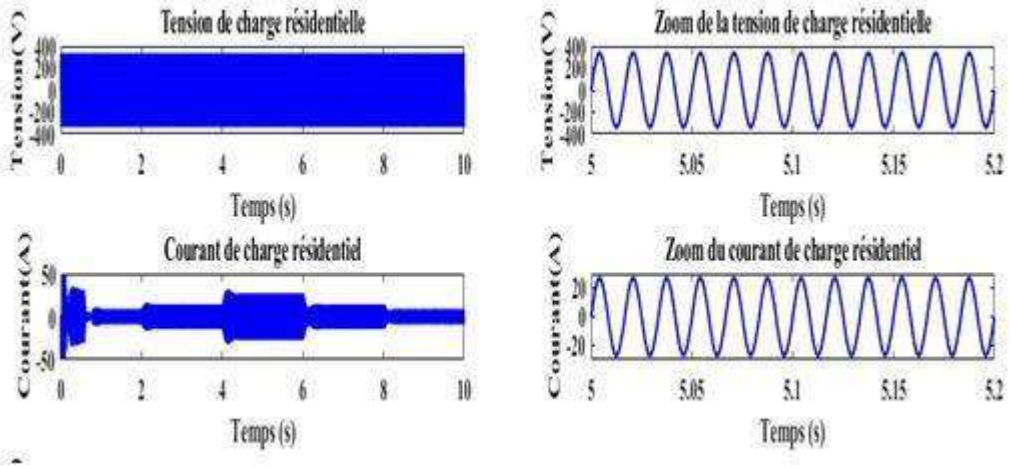


Figure IV.6 : Tension et courant de charge résidentielle.

On remarque d'après la figure IV.7 que la tension et le courant sont en phase, par conséquent, le système fournit la puissance active (figure IV.8) à la charge résidentielle avec un facteur de puissance unitaire comme prévu.

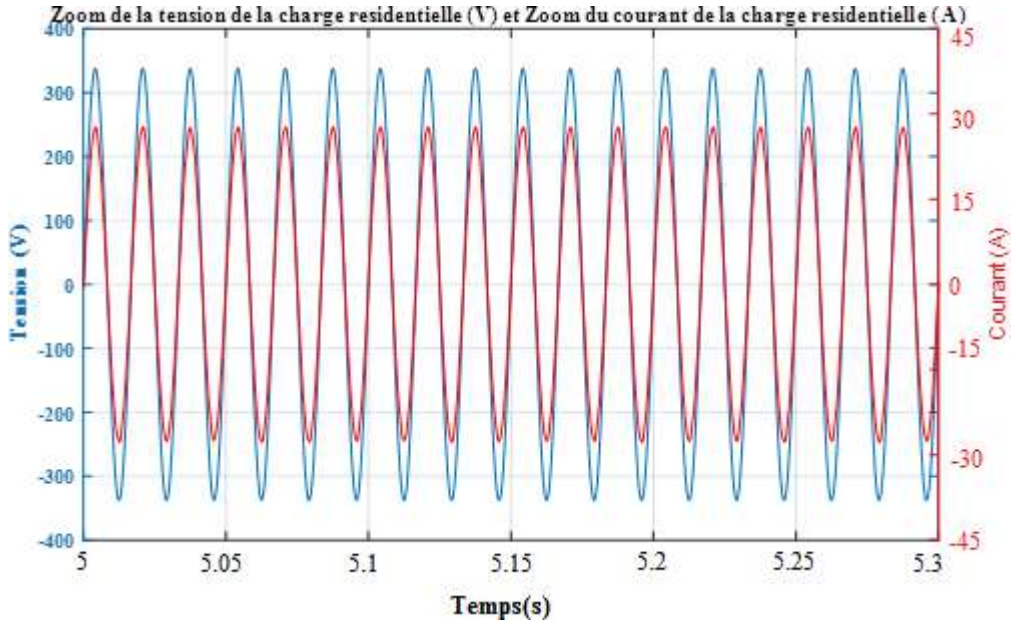


Figure IV.7 : La tension et le courant de la charge résidentielle sont en phase

D'après la figure IV.8, il est clair que la puissance délivrée par le système éolien et la puissance active générée par l'onduleur sont similaires. La différence entre les deux courbes est due aux pertes au niveau de l'onduleur.

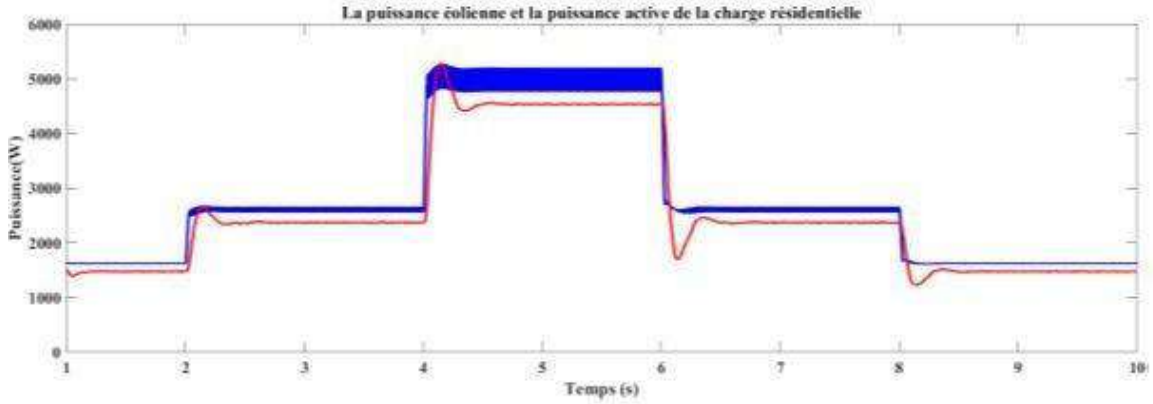


Figure IV.8 : Les puissances éolienne et la puissance active de la charge résidentielle.

IV.4 .2 Le deuxième profil

Le deuxième profil de vitesse varie d'un minimum de 6.5 m/s à un maximum de 7 m/s (Figure IV.9)

IV.4.2.1 Performance du système coté source

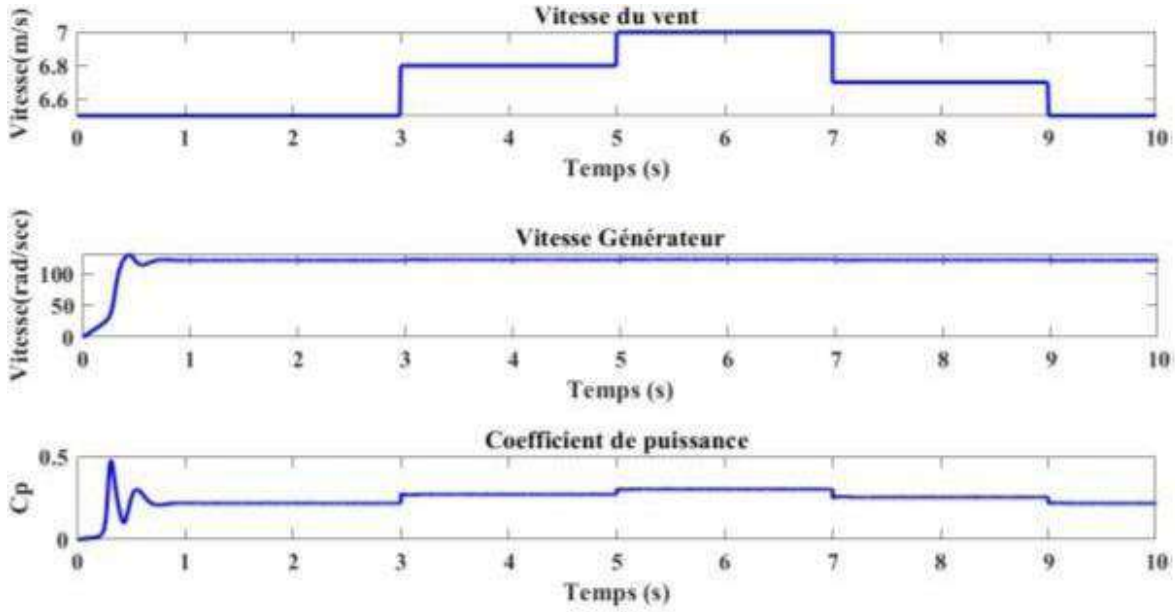


Figure IV.9 : Vitesse du vent, vitesse du rotor, coefficient de puissance pour le deuxième profil de la vitesse du vent.

On stabilise le vitesse du vent a 6.5 (m/s) pendant 3s comme il est présenté dans la figure IV.9 . Les résultats de la vitesse du rotor et du coefficient de puissance sont illustrés à la Fig IV.9.

La vitesse du générateur augmente de 0 (rad/sec) à 150 (rad/sec) dans un intervalle de [0s – 0.35s]. On remarque que la vitesse du rotor varie avec la vitesse du vent.

Il est clair d'après la figure VI.9 que le coefficient de puissance varie aussi avec la vitesse du vent.

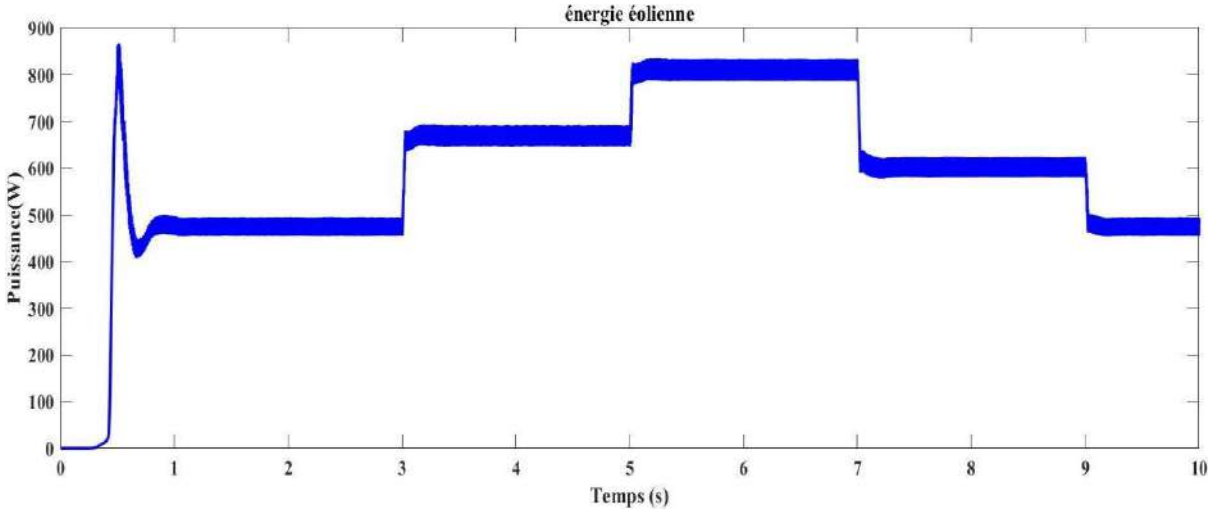


Figure IV.10 : La puissance de l'énergie éolienne.

D'après la figure IV.10, la puissance varie suivant le changement enregistré de la vitesse du vent.

IV.4 .2.2 Performance du système coté bus continu

La tension du bus continu augmente de 0V jusqu'à 450V dans l'intervalle [0s-0.3s] puis elle varie suivant la variation de la vitesse du vent (figure IV.11). La variation est très modérée.

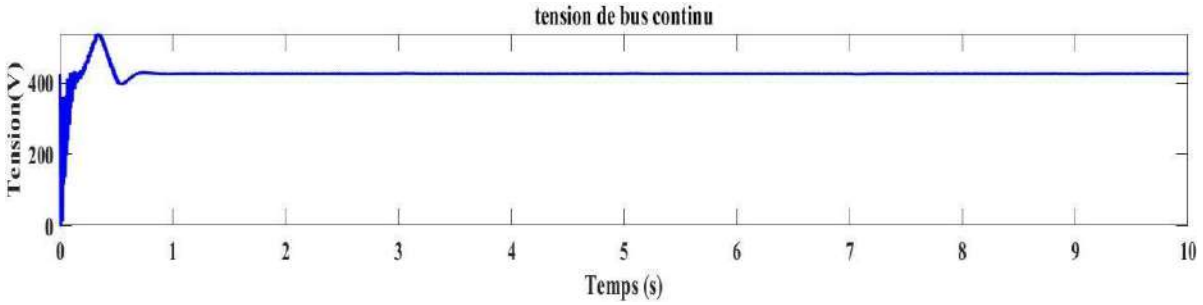


Figure IV.11 : Performance de la tension du bus continu.

IV.4 .2.3 Performance du système coté charge

Les courbes des courants et tensions se rapprochent de la forme sinusoïdale, comme il est illustré sur la Figure IV.12. Le courant injecté à la charge dépend très fortement de la vitesse du vent.

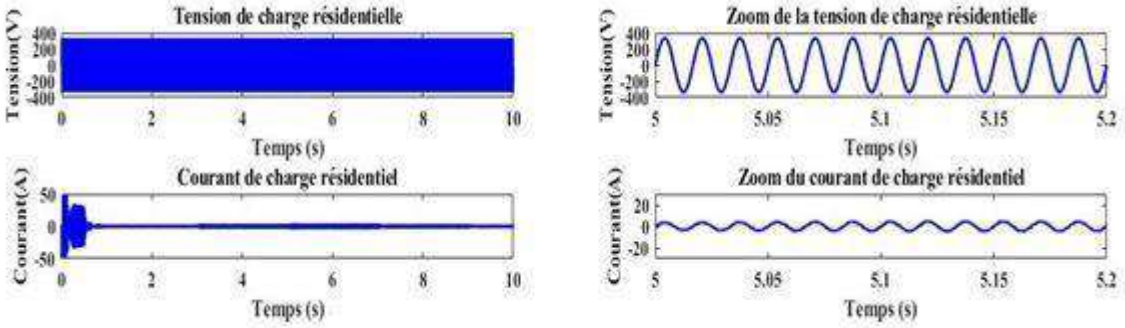


Figure IV.12 : Tension et courant de la charge résidentielle.

On remarque d'après la figure IV.13 que la tension et le courant sont en phase, par conséquent, le système fournit la puissance active (figure IV.14) à la charge résidentielle avec un facteur de puissance unitaire comme prévu.

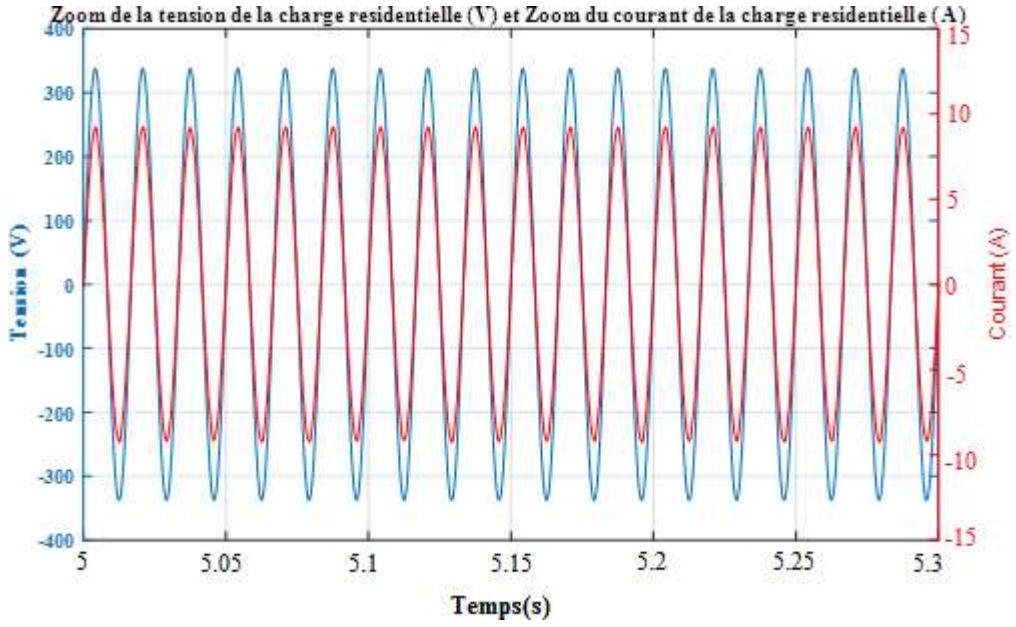


Figure IV.13 : La tension et le courant de la charge résidentielle sont en phase

D'après la figure IV.14, il est clair que la puissance délivrée par le système éolien et la puissance active générée par l'onduleur sont similaires. La différence entre les deux courbes est due aux pertes au niveau de l'onduleur.

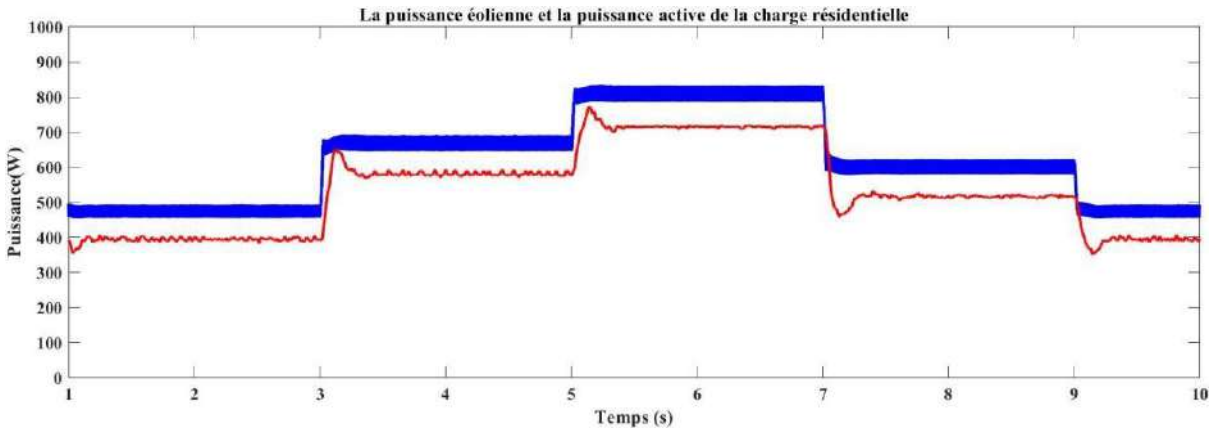
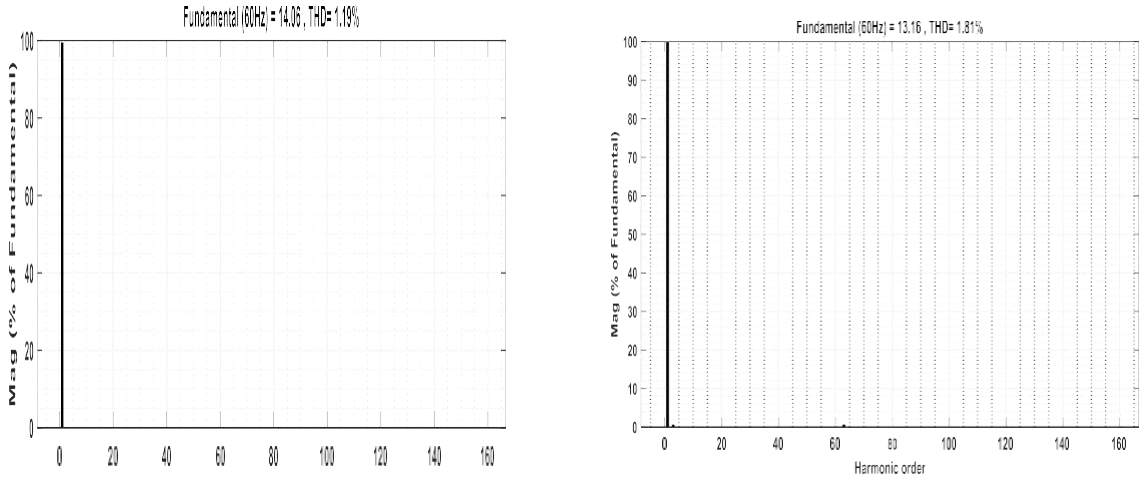


Figure IV.14 : les Puissances éolienne et la puissance active de la charge résidentielle.

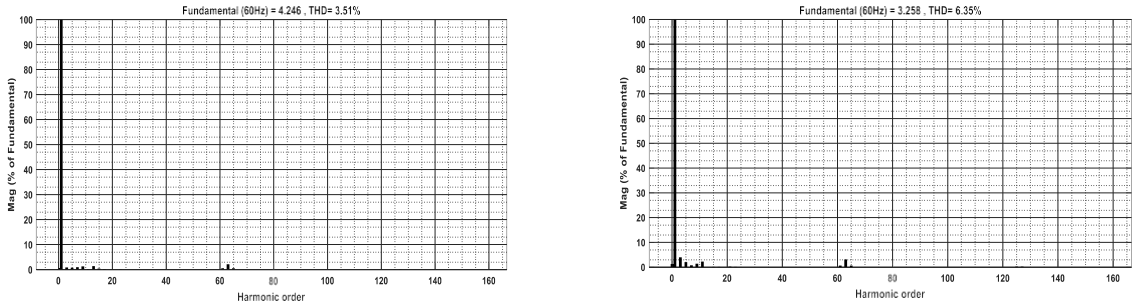
IV.4 .3 Le spectre harmonique du courant de la charge résidentielle

Les distorsions harmoniques totales (THD) du courant de charge résidentiel sont présentées dans les figures IV.15-IV.16 pour les deux profils de la vitesse du vent. Ces THD sont comparés avec ceux de la technique P&O.



Méthode PSO **Méthode P&O**

Figure IV.15 : La distorsion harmonique totale du courant de charge résidentiel pour le premier profil de la vitesse du vent avec le contrôleur PSO MPPT et contrôleur MPPT P&O



Méthode PSO **Méthode P&O**

Figure IV.16 : La distorsion harmonique totale du courant de charge résidentiel pour le deuxième profil de la vitesse du vent avec le contrôleur PSO MPPT et contrôleur MPPT P&O

Cela démontre que le contrôleur proposé présente une meilleure distorsion harmonique totale (THD) par rapport au régulateur P&O MPPT.

IV.5 Conclusion

Dans cette partie, on a présenté une approche qui utilise la technique de commande MPPT se basant sur algorithme PSO pour extraire la puissance maximale d'une éolienne résidentielle connectée au réseau électrique. Le système a été simulé sous deux profils de vitesse du vent (faible et forte)

D'après les simulations, le régulateur proposé fonctionne bien dans les deux conditions de vitesse du vent. Les résultats de simulation dans les deux cas prouvent que le THD est conforme à la norme IEEE 519, soit moins de 5%. Il est à noter que le contrôleur MPPT proposé ne nécessite aucune connaissance du modèle de la machine, ni des courbes caractéristiques de la turbine.

Conclusion général

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été menées pour améliorer les performances d'un système de conversion d'énergie éolienne à différentes vitesses de vent en utilisant des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour trouver une production d'énergie efficace lors de la variation des conditions atmosphériques (Vitesse du vent).

Dans la plupart des cas, les techniques MPPT conventionnelles utilisées pour maximiser le coefficient de puissance des turbines ne peuvent pas détecter les points de puissance globaux du système. Dans ce contexte, une nouvelle technique MPPT est proposée, basée sur l'optimisation par essaim de particules (PSO) pour détecter les points de puissance globaux de systèmes fonctionnant à vitesse de vent variable.

Dans le but d'améliorer l'efficacité des systèmes éoliennes, notamment pour la production énergétique, nous avons développé une stratégie de commande métaheuristique se basant sur l'optimisation par essaims particulaires (Particle Swarm Optimization **PSO**)

Dans le premier chapitre nous avons fait une étude descriptive sur l'énergie éolienne, la production de cette énergie, les composants d'une éolienne, ces différents types et le fonctionnement optimal d'une éolienne.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre une description du système éolien résidentiel connecté au réseau, la modélisation de la turbine, l'onduleur monophasé en pont, l'onduleur triphasé et le filtre LCL.

Ensuite nous avons présenté dans le troisième chapitre le principe de technique MPPT qui contient des méthodes MPPT locaux et globaux. La classification des techniques MPPT, les Techniques de recherche du point de puissance maximal local contiennent (MPPTs classiques) qui contient La technique Perturbation & Observation (P&O), La technique d'Incrémental Conductance (InCond), La technique de l'escalade dela colline (Hill climb). les MPPT d'intelligences artificielles qui contient Commande MPPT par la logique floue et enfin on a parlé aussi sur les techniques de recherche du point de puissance maximal global avec la technique d'optimisation par essaims des particulaires).

Les résultats de simulation dans le dernier chapitre prouvent bien l'efficacité de l'algorithme PSO en le comparant à l'algorithme P&O conventionnel.

REFERENCES BIBLIOGRAFIQUES

[1] : D. DJEMATI, « Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne », mémoire de magistère (2011), université de Batna, Batna.

[2] : N. HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire magister (2008), Université MENTOURI, Constantine.

[3] : L. Chan, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne ». IEEE Canadian Review Summer (Été 2002), pp. 1-5.

[4] : N. LA VERDURE, « L'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse (2005), Institut national polytechnique de Grenoble, France.

[5] : F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat (2003), Université de Nantes, France.

[6] : S. METATLA, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Mémoire de magister (2009), Ecole nationale supérieure polytechnique d'Alger.

[7] : A. BOYETTE, « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne », Thèse dedoctorat (2006), Université HENRI POINCARE, Nancy.

[8] : N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat (2005), Institut national polytechnique de Grenoble.

[9] : 1. S. NOUHOU, « Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Thèse (2007), École Nationale Polytechnique, Algérie.

[10] : B. MULTON, et al., « Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », JCGE'03 (2002).

[11] : B. MULTON, et al., « Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne » JCGE'03, Saint-Nazaire (2003).

[12] : M. T. LATRECHE, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire de Magister (2012), Université FERHAT ABBAS, SETIF.

[13] : 1. S. NOUHOU, « Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Thèse (2007), École Nationale Polytechnique, Algérie.

[14] : B. TOUAL, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d 'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Éolien à Vitesse Variable », Mémoire de magister (2010), Université de Batna, Algérie.

[15] : B. MULTON, et al., « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'ingénieur, D3 960, France.
[16] : A. M. SYLLA, « Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation », Mémoire (2013), Université de QUÉBEC à TROIS- RIVIÈRES.
[17] : J. MARQUES, et al., « A survey on variable-speed wind turbine system » In: Proceedings of Brazilian conference of electronics of power, vol. 1 (2003), p. 732- 8.
[18] : F. POITIERS, et al., « Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion Systems », International Journal of Renewable Energy Engineering, (2001).
[19] : M. T. LATRECHE, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire de Magister (2012), Université FERHAT ABBAS, SETIF.
[20] : T. Lequeu, « Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, (2004/2005).
[21] : G. Sturtzer et E. Smichel, « Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés », Edition Ellipses, (2000).
[22] : R. Abdessemed et M. Kadjoudj, « Modélisation des Machines Electriques », Presses de l'Université de Batna, (1997).
[23] : M. MCHICHOU, « Conception d'un onduleur photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, (2015).
[24] J. F. SULTANI, « Modelling, design and implementation of d-q control in singlephase grid-connected inverters for photovoltaic systems used in domestic dwellings », Mémoire de Master, Montfort University, uk, (2013).
[25] : Dossier technique « Eolienne et photovoltaïque », Ecole Sounelgaz Blida.
[26] : B. KALACHE et N. HAMI, « Commande d'un VSC d'un réseau résidentiel connecté aux réseaux », Mémoire de Master, (2020).
[27] : S. FEKROUN et O. OTMANINE, « Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un systeme photovoltaïque par un controleur flou type 2 t2flc », Mémoire de Master, Universite Yahia Fares de Médéa, (2017).
[28] : A. KAHLANE, L. Hassaine, M. Kherchi, « LCL filter design for photovoltaic grid connected systems », Revue des Energies Renouvelables, SIENR'14 Ghardaia 227 – 232, (2014).
[29] : H. REJDAL, « Optimisation du fonctionnement d'un champ photovoltaïque sous des conditions d'ombrage partiel », Mémoire master (2020), Université MOHAMEDSEDDIK BEN YAHIA – JIJEL.
[30] : C. CABAL, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse doctorat (2008), Universite de TOULOUSE.
[31] : A. S. CHERDAK et J. L. DOUGLAS, « Maximum power point tracker », U. S. Patent No. 3566/43 (1971).

[32] : H. ABBES, et al., « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », Revue des Energies Renouvelables (2014), Vol. 17 No. 3.
[33] : C. TIGRINE et O. AIT OUALI, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Mémoire master (2019), Université A. MIRA-BEJAIA.
[34] : H. AL-ATRASH, et al., « Statistical modeling of DSP-based hill-climbing MPPT algorithms in noisy environments », Conference and Exposition in Twentieth Annual IEEE Conference in Applied Power Electronics, APEC (2005), vol. 3, pp. 1773–1777.
[35] : W. XIAO, W. DUNFORD, « A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems », IEEE 35th annual Conference in Power electronics specialists, PESC (2004), vol. 3, pp. 1957–1963.
[36] : A. MELLIT, et S. A. KALOGIROU, « MPPT-based artificial intelligence techniques for photovoltaic systems and its implementation into field programmable gate array chips: Review of current status and future perspectives », Energy, V. 70, no 0, (2014), 1-21.
[37] : Z. SALAM, et al., «The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review », Applied Energy, V. 107,(2013), 135-148.
[38] : M.M. ALGAZAR, et al., «Maximum power point tracking using fuzzy logic control », *Electr Power Energy Syst* (2012), vol. 39, pp. 21–28.
[39] : A. BELKAID « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », Thèse doctorat (2015), UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1.
[40] : Y.-H. LIU, et al., « A Particle Swarm Optimization-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions », IEEE Trans. Energy Convers (2012), vol. 27, no 4, p. 1027-1035.
[41] : H. LE-HUY, « Introduction à MATLAB et Simulink », (1998), Université Laval Québec, CANADA.