

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur**  
**et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**  
**Faculté de Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Technologie**  
**Filière : Electrotechnique**  
**Spécialité : Commande Electrique**

**Thème**

**Commande d'un système hybride (éolien-  
photovoltaïque) totalement autonome**

Réalisé par :

DRICI Abdelhak

BERRIM Ahmed

Encadré par :

Dr.SERHOUD Hicham

**Soutenu en JUIN 2018**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

*Nos remerciements s'adressent en premier lieu à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciement à notre encadreur Dr.H.Serhoud qui nous a apporté une aide précieuse. Nous lui exprimons notre gratitude pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et ses encouragements.*

*Nous remercions aussi tous les enseignants qui ont contribués à notre formation et à tous les membres du jury qui ont accepté à juger ce travail.*

*En fin, nous tenon sa exprimer tous nos reconnaissances et notre gratitude à toutes les personnes qui nous ont aidés et encouragé dans les moments pénibles et qui nous ont donnés la force et la volonté de continuer et de réaliser ce modeste travail.*

*Abdelhak.D*

*Ahmed.B*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la fleur de ma vie ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, ses sacrifices tout au long de ma vie.*

*Mon honorable et très cher père qui a sacrifié sa vie pour qu'on puisse se retrouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.*

*A mes frères et mes sœurs.*

*A Toute ma famille.*

*A tous mes amis intimes : «...», et les beaux moments à El-oued.*

*A Toute la promotion 2018 d'électrotechnique*

*Abdelhak, D*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la fleur de ma vie ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, ses sacrifices tout au long de ma vie.*

*Mon honorable et très cher père qui a sacrifié sa vie pour qu'on puisse se retrouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.*

*A mes frères et mes sœurs.*

*A Toute ma famille.*

*A tous mes amis intimes : «...», et les beaux moments à El-oued.*

*A Toute la promotion 2018 d'électrotechnique*

*Ahmed.B*



### ملخص:

يتناول هذا العمل دراسة نظام الطاقة الهجينة (طاقة الرياح-الضوئية) ،التي تستخدم للتشغيل في نظام معزول على الشبكة. باستعمال آلة تغذية مزدوجة غير متزامنة (MADA) محفزة بواسطة مولد الطاقة الضوئية حيث يعمل كمولد مستقل، يمكن تشغيل الماكينة (DFIG) والتحكم فيه من الدوار عن طريق محول الطاقة، أما الجزء الثابت فهو معزول. يتم التحكم في الماكينة باستخدام التحكم الشعاعي، للتحكم و لتثبيت الفولتية والتردد خلال تأثيرات الحمل المعزول، وأخيرا يتم تحليل قوة الأداء عن طريق المحاكاة بواسطة برنامج Matlab / Simulink.

**كلمات مفتاحية:** آلة تغذية مزدوجة غير متزامنة، نظام الطاقة الهجينة (طاقة الرياح-الضوئية)، محول الضبط، نظام معزول.

### Résumé :

Ce travail porte sur l'étude d'un système hybride d'énergie (photovoltaïque -éolien), utilisé pour alimenter une charge isolée. En utilisant une machine asynchrone à double alimentation (MADA) excité par une générateur photovoltaïque ou fonctionne comme générateur autonome, La DFIG peut être alimentée et commandé à partir du rotor avec un convertisseur de puissance, le stator connecté aux charges isolées. La commande vectorielle utilisée pour le contrôle les variations des tensions et de la fréquence lors des impacts de charge isolée, enfin les performances et la robustesse sont analysées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink.

**Mots clés :** Machine Asynchrone à Double Alimentation, énergies renouvelables hybride (photovoltaïques- éolienne), convertisseur statique, système isolé.

---

# Sommaire

# *Sommaire*

INTRODUCTION GENERALE .....	01
<i>Chapitre I :</i>	
<i>Généralité sur les systèmes éolien-photovoltaïque</i>	
I.1 Introduction .....	04
I.2 Généralités sur les systèmes solaires .....	04
I.2.1 Définition de systèmes solaires .....	04
I.3 Energie solaire photovoltaïque .....	04
I.3.1 Définition .....	04
I.3.2 Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) .....	05
I.3.2.1 Cellules monocristallines .....	05
I.3.2.2 Cellules poly cristallines .....	05
I.3.2.3 Cellules amorphes .....	05
I.3.3 Principe de fonctionnement .....	06
I.3.4 Module photovoltaïque .....	07
I.3.5 Secteurs d'applications .....	07
I.3.6 Avantages et inconvénients de la système photovoltaïque .....	08
I.4 Généralités sur les systèmes Eoliens .....	09
I.4.1 Définition du systèmes Eoliens .....	09
I.4.2 Différent types d'un système éoliennes .....	10
I.4.2.1 Eoliennes à axe horizontal .....	10
I.4.2.2 Eoliennes à axe vertical .....	10
I.4.3 Principe aux composants d'un système éolien .....	11
I.4.4 Principe de fonctionnement .....	12
I.4.5 Utilisation des systèmes Eoliens .....	12
I.4.6 Types des machines électriques utilisées dans le système éolien .....	13
I.4.6.1 Générateur Asynchrone(IG) .....	13
I.4.6.2 Générateur Synchrone(SG) .....	14
I.4.6.2.1 Machine asynchrone à cage .....	14
I.4.6.2.2 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" .....	15
I.4.7 Avantages et inconvénients de la système Eoliens .....	16
I.5 Conclusion .....	17

---

## Chapitre II :

*Modélisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque*

II.1 Introduction .....	18
II.2 Définition du système d'énergie hybride (S.E.H) .....	18
II.3 Modélisation d'un système hybride éolien –photovoltaïque .....	19
II.3.1 Modélisation d'un système éolien .....	20
II.3.1.1 Modèle du vent .....	20
II.3.1.2 Modélisation de la turbine .....	20
II.3.1.2.1 Modèle de la Turbine .....	21
II.3.1.2.2 Modèle du Multiplicateur .....	22
II.3.1.2.3 Modèle de l'arbre .....	22
II.3.1.3 Modélisation de la génératrice Asynchrone à Double Alimentation .....	23
II.3.1.3.1 Modèle mathématique de la GADA à vide .....	23
II.3.1.3.2 Modèle mathématique de la GADA en charge .....	24
II.3.1.3.3 Système de génération DFIG autonome .....	26
II.3.2 Modélisation d'un système photovoltaïque .....	27
II.3.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	28
II.3.2.2 Caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque .....	29
II.3.2.3 Paramètres électriques du module photovoltaïque .....	30
II.3.2.3.1 Tension de circuit ouvert .....	30
II.3.2.3.2 Courant de court-circuit .....	30
II.3.2.3.3 Puissance maximale .....	31
II.3.2.3.4 Facteur de forme .....	31
II.3.2.3.5 Rendement .....	31
II.3.2.4 Influence des différents paramètres .....	31
II.3.2.4.1 Influence de l'éclairement .....	31
II.3.2.4.2 Influence de la température .....	32
II.3.2.5 Modélisation de l'hacheur survolteur .....	33
II.3.2.5.1 Principe de fonctionnement .....	33
II.3.2.6 Principe de fonctionnement de MPPT.....	34
II.3.2.7 Méthode de la perturbation et l'observation (P&O).....	35
II.3.3 Contrôle vectoriel du redresseur MLI.....	36

II.3.3 Modélisation de l'onduleur .....	38
II.4 Conclusion .....	40
<i>Chapitre III :</i>	
<i>Simulation d'un système hybride éolien- photovoltaïque</i>	
III.1 Introduction .....	41
III.2 Système éolienne Autonome.....	41
III.2.1 Simulation de la GADA fonctionnement autonome.....	42
III.3 Système hybride éolien- photovoltaïque .....	46
III.3.1 Simulation d'un système hybride éolien- photovoltaïque.....	46
III.4 Conclusion.....	50
CONCLUSION GENERALE.....	51

---

## ***LISTE DES FIGURES***

### *Chapitre I :*

#### *Généralité sur les systèmes éolien-photovoltaïque*

Figure I.1: Système Photovoltaïque.....	05
Figure I.2: composition d'une cellule au monocristallin.....	06
Figure I.3: Module PV constitue par NS cellules en série et NP cellules en parallèle.....	07
Figure I.4: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	09
Figure I.5: Eoliennes à axe horizontal.....	10
Figure I.6: Eoliennes à axe vertical.....	11
Figure I.7: composants d'un système éolien.....	12
Figure I.8: Machine synchrone connectée directement au réseau.....	14
Figure I.9: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	15
Figure I.10: Machine asynchrone à double alimentation.....	15

### *Chapitre II :*

#### *Modélisation d'un système hybride éolien- photovoltaïque*

Figure II.1: Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.....	19
Figure II.2: Système hybride éolien –photovoltaïque.....	19
Figure II.3: Différent partie de la turbine.....	20
Figure II.4: Modèle de la turbine éolienne.....	22
Figure II.5: Schéma de principe du système éolien dans un site isolé.....	24
Figure II.6: Schéma de principe du système éolien avec charge isolée.....	26
Figure II.7: Schéma de système éolienne avec GADA autonome.....	27
Figure II.8: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	28
Figure II.9: Caractéristique d'un panneau photovoltaïque.....	29

---

Figure II.10: Différentes zones de Caractéristique I(V) entre générateur et module Photovoltaïque.....	30
Figure II.11: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(v)et p(v) à1000 w/m <sup>2</sup> .....	32
Figure II.12: Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) à25°c.....	32
Figure II.13: Schéma électrique du convertisseur.....	33
Figure II.14: Système photovoltaïque avec MPPT.....	35
Figure II.15: Organigramme d'algorithme MPPT ( P&O).....	36
Figure II.16: Structure classique d'une PLL triphasée.....	37
Figure II.17: Structure du redresseur avec régulateur de La tension redressée.....	38
Figure II.18: Schéma d'un onduleur de tension.....	39

### *Chapitre III :*

#### *Simulation d'un système hybride éolien- photovoltaïque*

Figure III.1: Système éolienne autonome avec GADA .....	42
Figure III.2: Système de génération de puissance autonome avec GADA .....	42
Figure III.3: Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de DFIG autonome.....	45
Figure III.4: Système hybride éolien- photovoltaïque avec GADA .....	46
Figure III.5: Résultats de simulation <i>Résultats de simulation d'un système hybride et autonome (DFIG-PV)</i> .....	49

---

---

## ***LISTE DES SYMBOLES***

$\beta$	Angle de l'orientation de pale
$C_p$	Coefficient de puissance
$P_v$	Puissance du vent
$\rho$	Densité d'air
$R$	Longueur de pales
$v$	Vitesse du vent
$\lambda$	Ratio de vitesse
$\Omega_r$	Vitesse mécanique de la turbine en rad/s
$C_r$	Couple mécanique
$C_{mec}$	Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi
$G$	Rapport de multiplication.
$\Omega_g$	Vitesse du générateur (rad/s mécanique).
$J_T$	Inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m <sup>2</sup> ).
$C_T$	Couple de la turbine
$f_T$	Coefficient de frottement visqueux
$V_s$	Vecteur tension statorique
$I_s$	Vecteur courant statorique
$I_r$	Vecteur courant rotorique
$\Phi_s$	Vecteur flux statorique
$\Phi_r$	Vecteur flux rotorique
$R_s$	Matrice résistance statorique
[Rr]	Matrice résistance rotorique.
[Lss]	Matrice inductance statorique.
[Lrr]	Matrice inductance rotorique.

---

[Msr]	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
$M_0$	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase Correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont, alors, alignés).
$\omega_s$	Pulsation électrique statorique.
$\omega_r$	Pulsation de glissement ( $\omega_s - \omega$ ).
$R_s$	Résistance statorique.
$R_r$	Résistance rotorique
$l_s$	Inductance propre d'une phase statorique.
$l_r$	Inductance propre d'une phase rotorique.
$M_s$	Inductance mutuelle entre deux phases statorique.
$M_r$	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.
$M_{sr}$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe as coïncide avec l'axe ar.
$L_s$	Inductance cyclique statorique.
$L_r$	Inductance cyclique rotorique.
$L_m$	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
$i_{dc}$	Courant actif nécessaire pour charger le bus continu
$i_{dqr}$	Composantes du courant rotorique dans le repère $(d, q)$
$i_{dqs}$	Composantes du courant statorique dans le repère $(d, q)$
$i_{abcs}$	Courants instantanés des phases statoriques
$i_{abcr}$	Courants instantanés des phases rotoriques
$P_v$	Puissance portée par le vent
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse
$[P(\theta)]$	Transformation de Park directe
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
$\varphi_{sd}\varphi_{sq}\varphi_{rd}\varphi_{rq}$	Flux statoriques et rotoriques dans le repère $(d, q)$
Iph	Photo courant (A)

---

$I_D$	Courant générer par la diode (A)
$I_{RP}$	Courant traversant $R_p$ (A)
$R_p$	Résistance parallèle de la cellule ( $\Omega$ )
$V$	Tension de la cellule (V)
$R_s$	Résistance série de la cellule ( $\Omega$ )
$I_0$	Courant de saturation (A)
$A$	Facteur d'idéalité de la cellule (.)
ICC	Courant de court-circuit (A)
FF	Facteur de forme
$\eta_m$	Rendement énergétique maximum (%)
S	Surface de la cellule solaire (m <sup>2</sup> )
$V_{CO}$	Tension de circuit ouvert
$p_{max}$	Puissance maximale
$ff$	Facteur de forme
SEH	Système d'énergie hybride
$N_p$	Nombre de modules dans le panneau en parallèle
$N_s$	Nombre de modules dans le panneau en série
PV	Photovoltaïque
DFIG	Doubly-Fed Electric machine (machine asynchrone à double alimentation)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (point maximal de puissance)
BDFG	Brushless Doubly Fed Generator (Génératrice asynchrone à double Alimentation)
PLL	Phase Locked Loop

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

### INTRODUCTION GENERALE

Une grande partie de l'énergie consommée dans le monde provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

Ce qui nécessitait une recherche urgente sur les sources d'énergie renouvelables. Parmi les nombreuses solutions de rechange, le photovoltaïque et l'énergie éolienne ont été considérés comme prometteuses pour répondre à la demande croissante pour l'énergie. Les sources d'énergie éoliennes et photovoltaïques sont inépuisables, les processus de conversion sont sans pollution, et leur disponibilité est gratuite. Pour les systèmes à distance tels que les relais de télécommunication en plein désert, les stations terrestres de satellites, ou aux sites isolés qui sont loin d'un système d'énergie conventionnelle, les systèmes hybrides ont été considérés comme des sources alternatives attrayantes et privilégiées, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires [1].

Le système hybride (éolienne photovoltaïque) complètement indépendant des autres sources d'énergie, qui fournit à l'utilisateur de l'électricité sans connexion au réseau électrique. Ils sont généralement utilisés pour l'exploitation de maisons, d'îles et de montagnes isolées, ainsi que pour des applications telles que la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes hybrides indépendants sont installés comme la source d'énergie électrique la plus économique.

Le rôle d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales. Le nombre de kilowattheures produit peut paraître insignifiant devant la capacité de production énergétique du pays, mais ces quelques dizaines ou centaines de kilowattheures peuvent ranimer tout l'espoir d'un village ou d'une communauté [2].

Le type de machine utilisé dans ce système est la Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA) à vitesse variable. Dans le but de réduire la puissance des convertisseurs de puissance tout en générant une puissance de sortie importante par rapport aux autres type des machines électriques.

Les coûts de raccordement au réseau sont importants et parfois, le raccordement est tout simplement impossible. C'est pourquoi les systèmes autonomes sont intéressants pour répondre aux besoins énergétiques.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres :

En premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de système éolien et photovoltaïque.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de chaque élément constitue le système hybride éolien –photovoltaïque.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation de système hybride éolien – photovoltaïque.

Nous terminerons ce modeste travail avec (DFIG-PV) une conclusion générale qui résume notre étude.

# Chapitre I :

## Généralité sur les systèmes éolien-photovoltaïque

**I.1 Introduction :**

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponible, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire [3].

- ❖ Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire la chaleur ou l'électricité.
- ❖ La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- ❖ L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique.
- ❖ La géothermie est l'utilisation directe des gradients des températures terrestres ou de sources chaudes.

Dans ce premier chapitre, on présente les différentes caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiées dans ce mémoire : le solaire et l'éolien.

**I.2 Généralité sur les systèmes solaires :****I.2.1 Définition de systèmes solaires:**

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée.

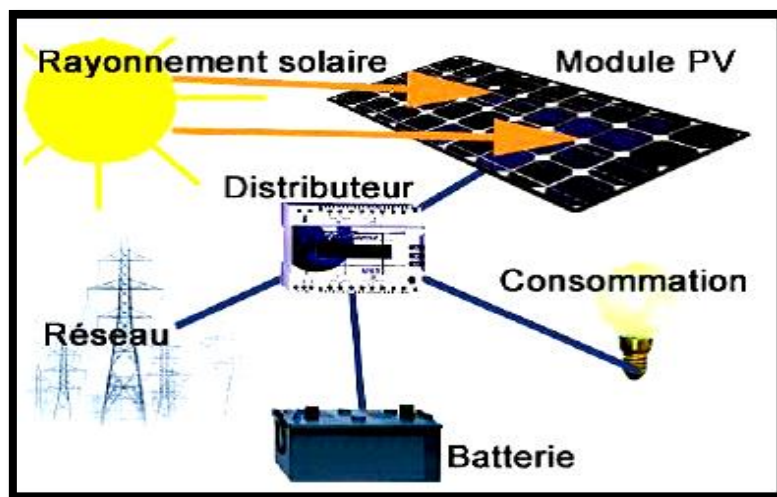
Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique.

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable; en effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m<sup>2</sup>/jour [4].

**I.3 Energie solaire photovoltaïque :****I.3.1 Définition :**

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de

cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie .L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [5].



*Figure I.1: Système Photovoltaïque.*

### **I.3.2 Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :**

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellules est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [6].

#### **I.3.2.1 Cellules monocristallines :**

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.

#### **I.3.2.2 Cellules poly cristallines :**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible ( de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8 en la portoir)

#### **I.3.2.3 Cellules amorphes :**

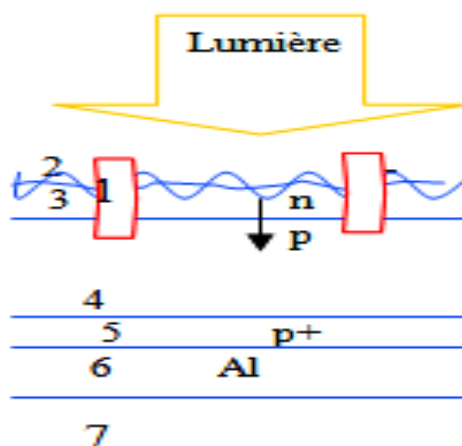
Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire) , mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un couteux élevé . Elles sont utilisés couramment dans de petits produits de consommation telle que les calculatrices solaires ou encore les montres.

L'avantage de ce demie type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) [6].

### I.3.3 Principe de fonctionnement :

Découvert par le physicien français A. BECQUEREL dès 1839, l'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (Volt), par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p .

- 1- Grille de métallisation
- 2- couche antireflet
- 3 -surface avant dopée n et texturée
- 3-4 jonction et champ électrique
- 4-substrat p
- 4-5 BSF «champ »arrière
- 5- Dopage p+
- 6- Métallisation d'aluminium
- 7- Métallisation soudable



*Figure I.2 : composition d'une cellule au monocristallin.*

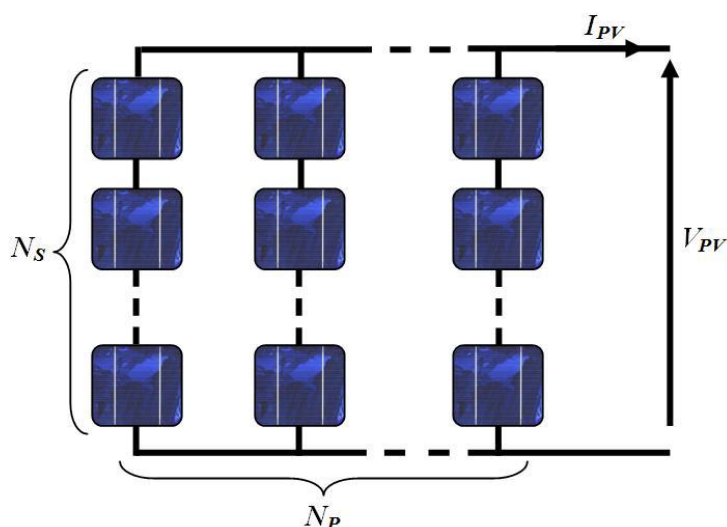
Donc ce principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie( $h\nu$ ).

- ❖ Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ( $E_g = E_c - E_v$ ), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron- trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires (*Figure I.2*).

- ❖ Si les photons ont une énergie très supérieure à  $E_g$ , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons réseau cristallin puis perdue en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.
- ❖ Si les photons ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [3].

### I.3.4 Module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.



**Figure. I.3:** Module  $P_V$  constitué par  $N_s$  cellules en série et  $N_p$  cellules en parallèle

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation [7].

### I.3.5 Secteurs d'applications :

- **Domaine spatial :** C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites,...) remontent aux années soixante.
- **Habitation isolée :** L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement.
- **Industrie isolée :** La technologie photovoltaïque est de plus en plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, télécommunication, ...).

- **Centrale de puissance** : Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés [4].

### I.3.6 Avantages et inconvénients du système photovoltaïque :

#### Avantages :

- ✓ Haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ Caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.
- ✓ Coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ Technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- ✓ Fonctionnement de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- ✓ Flexibilités et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- ✓ Temps de réalisation d'une centrale PV minimum.
- ✓ Longue durée de vie.
- ✓ Elimination des frais des risques de transport associé des énergies fossiles [8].

#### Inconvénients :

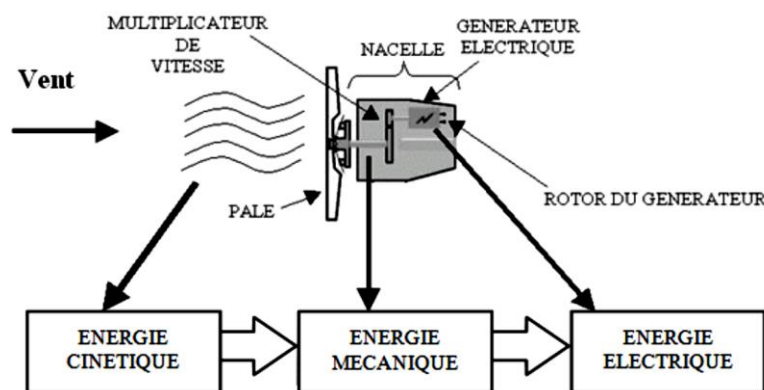
- ✓ Fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des Investissements d'un coût élevé.
- ✓ Rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- ✓ Générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✓ Tributaire des conditions météorologiques.

- ✓ Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage ( $< 30V$ ), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- ✓ Stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% (70% maximum) de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement [8].

#### I.4 Généralités sur les systèmes Eoliens :

##### I.4.1 Définition du système Eoliens :

Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [9].



*Figure. I.4: Conversion de l'énergie cinétique du vent*

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines.

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [10].

##### I.4.2 Différents types d'un système éolien :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe Horizontal.

**I.4.2.1 Eoliennes à axe horizontal:**

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

- ❖ Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent.
- ❖ Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.
- ❖ Elles ont un rendement élevé.
- ❖ Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple [5].



*Figure. I.5: Eoliennes à axe horizontal*

**I.4.2.2 Eoliennes à axe vertical :**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Les principaux capteurs à axe verticale sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieux et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à trainée différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants [11].



*Figure. I.6: Eoliennes à axe vertical*

### **I.4.3 Principe composants d'un système éolien :**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes mais généralement constituée de trois éléments principaux:

Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre présente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure.

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapides, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [9].

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

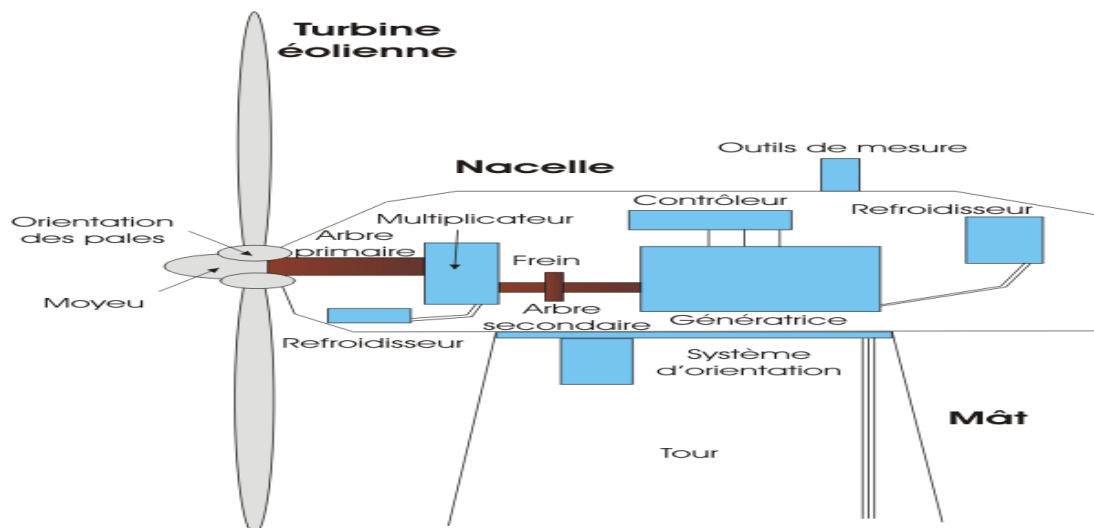


Figure. I. 7: composants d'un système éolien

#### I.4.4 Principe de fonctionnement :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. 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, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [5].

#### I.4.5 Utilisation des systèmes Eoliens :

La technologie des systèmes éoliens, très fiable et très souple, depuis des siècles, de multiples usages :

- **Pompage de l'eau:** Depuis des générations, on utilise le vent comme source d'énergie fiable et économique dans les systèmes de pompage de l'eau. Dans les régions rurales ou éloignées.
- **Fermes et ranchs:** Les fermiers utilisent le vent pendant des siècles pour pomper eau. Les systèmes éoliens peuvent, de nos jours, rendre encore plus de services dans une exploitation agricole moderne. Comme ils représentent la solution idéale lorsqu'on a besoin d'électricité à basse tension dans des endroits éloignés.
- **Usage domestique:** Les habitants de la campagne, désireux de réduire l'effet indésirable sur l'environnement de leur consommation d'énergie, peuvent

restreindre leur dépendance par rapport au réseau d'électricité en utilisant un système éolien [10].

#### **I.4.6 Types des machines électriques utilisées dans le système éolien:**

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement, le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépende par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [12] :

##### **Fonctionnement à vitesse fixe:**

- ✓ Système électrique plus simple.
- ✓ Plus grande fiabilité.
- ✓ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ✓ Pas besoin de système électrique de commande.
- ✓ Moins cher.

##### **Fonctionnement à vitesse variable :**

- ✓ Augmentation du rendement énergétique.
- ✓ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- ✓ Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité

Les deux types des machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les principales caractéristiques de chacun de ces types de machine :

##### **I.4.6.1 Générateur Asynchrone(IG) :**

Le principe de fonctionnement d'une génératrice asynchrone peut être traduit comme suit: C'est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour réaliser la génération de l'énergie électrique la machine doit être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge) le cas d'une génératrice à cage d'écureuil [10].

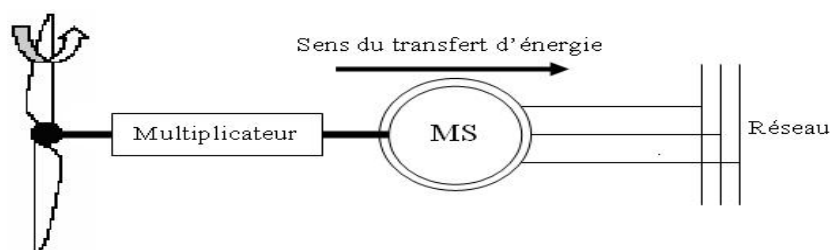
Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse. la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator [13].

### I.4.6.2 Générateur Synchrone(SG) :

L'avantage du générateur synchrone sur l'IG est l'absence de courant réactif de magnétisation.

Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent. Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un convertisseur qui comporte un étage redresseur, un bus continu et un onduleur : on reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite. (Fig.I.8), la régulation de puissance s'effectue en partie au niveau de ce convertisseur.

Lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles. Le générateur synchrone à aimants permanents (PMSG) est plus simple est moins coûteux avec la caractéristique d'auto excitation qui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne [14].



*Figure.I.8: Machine synchrone connectée directement au réseau*

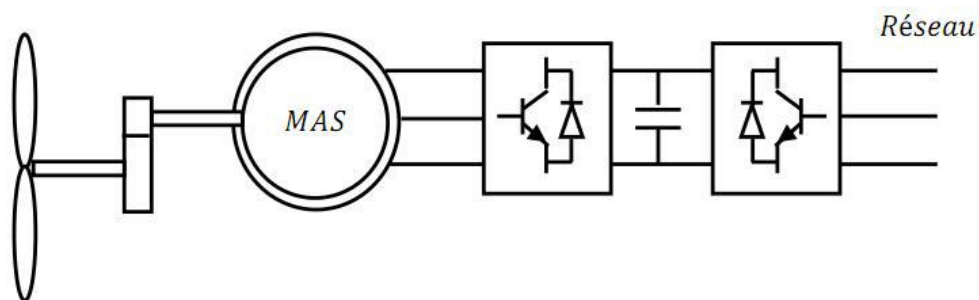
Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones a rotor bobine.

#### I.4.6.2.1 Machine asynchrone à cage :

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses.

Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Dans les années 90, les Danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant [12].



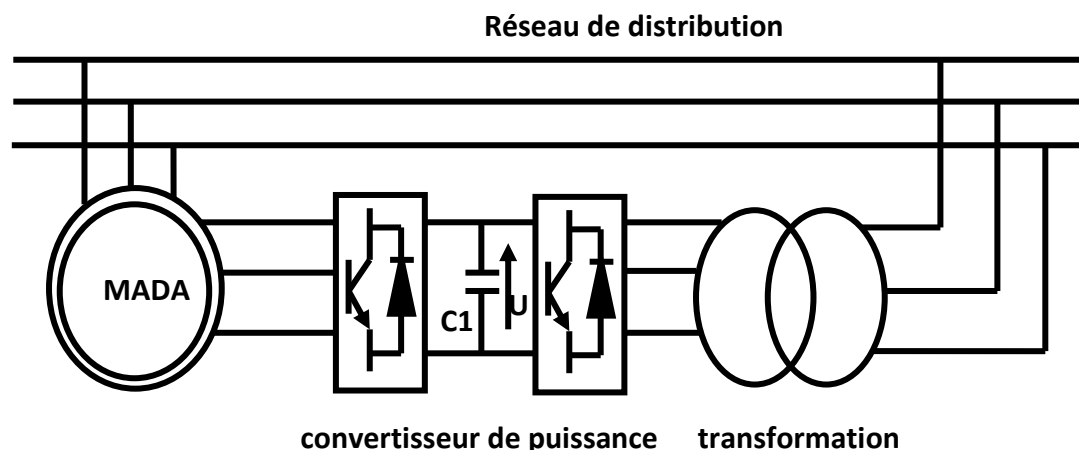
*Figure.I.9. Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.*

#### I.4.6.2.2 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" :

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable.

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur.

A la place du rotor a cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobine dont le réglage électrique assure la variation du glissement.



*Figure.I.10. Machine asynchrone à double alimentation.*

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté

directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [12].

#### **I.4.7 Avantages et inconvénients du système Eoliens :**

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

##### **Avantages:**

- ✓ l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO<sub>2</sub>.
- ✓ L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- ✓ Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires [3].

##### **Inconvénients:**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- ✓ **Impact visuel :** Ça reste néanmoins un thème subjectif.
- ✓ **Bruit :** il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- ✓ **Qualité de la puissance électrique :** la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- ✓ **Coût de l'énergie éolienne :** par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût

reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [13].

**I.5 Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes éoliens et les systèmes solaires. La première partie et après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur principe de fonctionnement ont été décrits. La seconde partie du chapitre a été consacrée aux systèmes solaires et plus précisément ceux d'origines photovoltaïques.

## Chapitre II :

Modélisation d'un système  
hybride éolien- photovoltaïque

**II.1 Introduction :**

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique. Elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée.

A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation directe entre l'énergie produits par l'installation et la demande de l'utilisation. Tandis que l'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année est obtenue à partir d'une étude théorique et expérimentale.

Dans ce cadre, nous présenterons dans ce chapitre d'abord, la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien, en ce proposent l'élaboration des modèles mathématiques pour les deux systèmes de productions, afin de renforcer la maîtrise de leur exploitation, surtout du point de vue des écoulements des puissances de production en fonction des conditions météorologiques données ou estimées. Puis nous passons au dimensionnement des différents constituants de ce système hybride afin d'obtenir sa taille optimale [3].

**II.2 Définition du système d'énergie hybride (S.E.H)**

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

Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue.

Les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit(Voir Figure II.1) [5].



Figure II.1 : Système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien

A : Panneau Photovoltaïque ; a : Parafoudre ; B : Éolienne ; m : Moniteur de batterie ; R : Chargeur de batterie ; S : Sectionneur ;

1 : Disjoncteur de protection ; 2 : Régulateur charge/décharge ; 3 : Disjoncteur CC ;

4 : Batterie ; 5 : Onduleur ; 6 : Coffret de branchement électrique ; 7 : Charge électrique ;

### II.3 Modélisation d'un système hybride éolien –photovoltaïque :

La modélisation est un moyen destiné a représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique .elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système hybride éolien –photovoltaïque et la demande de l'utilisateur[2].

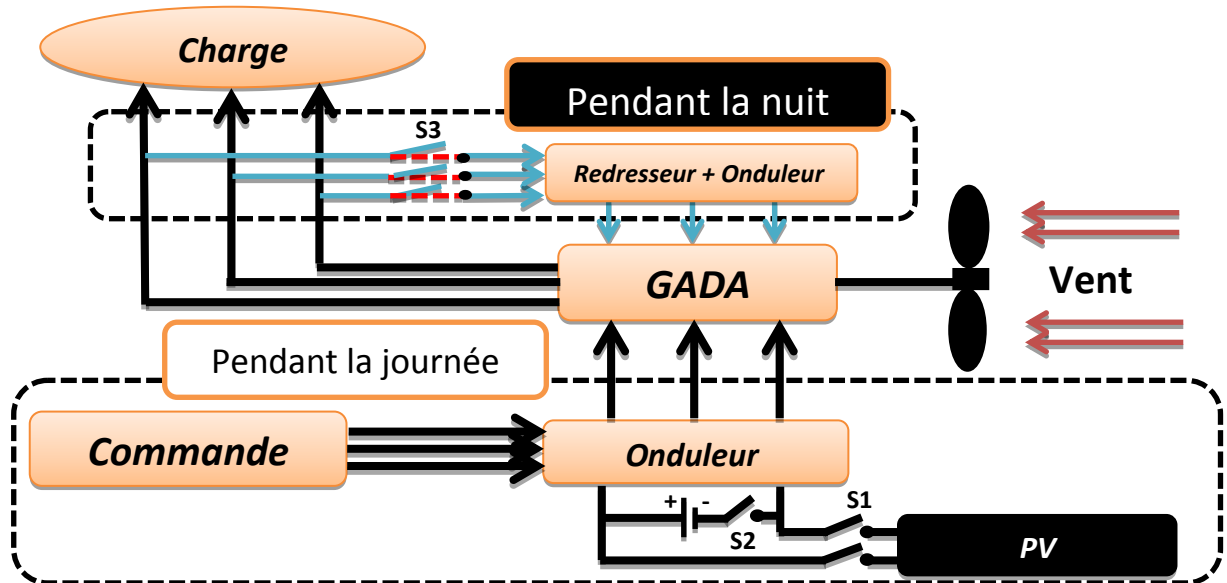


Figure II.2: système hybride éolien –photovoltaïque

### II.3.1 Modélisation d'un système éolien :

#### II.3.1.1 Modèle du vent :

Le vent est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Elle sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [4].

#### II.3.1.2 Modélisation de la turbine :

Dans cette partie, il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice :

- ✓ la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables;
- ✓ le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- ✓ L'arbre relie la partie mécanique à la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur

Et la figure ci-dessous représente différentes parties de la turbine :

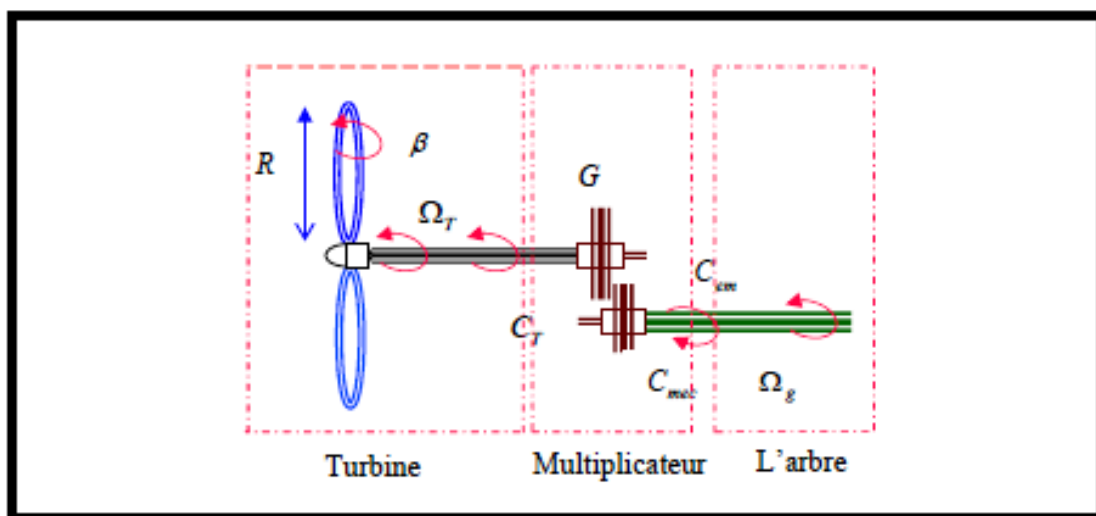


Figure.II.3: Différentes parties de la turbine

### II.3.1.2.1 Modèle de la Turbine :

La relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite donne par l'équation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (2-1)$$

Où :

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  : Masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression.

$v$  : La vitesse du vent.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coefficient de puissance  $C_p$ ) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_D = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (2-2)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine.

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{v} \quad (2-3)$$

Le couple mécanique à la sortie de la turbine est défini par :

$$C_r = \frac{P_D}{\Omega_r} \quad (2-4)$$

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient  $C_p$  et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5156 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} - 0.0068 \lambda \quad (2-5)$$

$$\text{et} \quad \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1} \quad (2-6)$$

Avec :

$\beta$  : Angle de calage.

$R$  : Longueur de la pale.

$\Omega_r$  : Vitesse mécanique de la turbine en rad/s.

Pour notre exemple d'éolienne, le coefficient de puissance  $C_p$  est donné l'équation (2-6).

**II.3.1.2.2 Modèle du Multiplicateur :**

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur:

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{Turbine} \tag{2-7}$$

Où:

G:Rapport de multiplication.

$C_{mec}$ : Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi

$$\Omega_g = G\Omega_{Turbine} \tag{2-8}$$

Où:

$\Omega_g$ : Vitesse du générateur (rad/s mécanique).

**II.3.1.2.3 Modèle de l'arbre :**

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$J_T \frac{d\Omega_g}{dt} = C_T - f_T \Omega_g \tag{2-9}$$

Où :

$J_T$ : Inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m<sup>2</sup>).

$f_T$ : Coefficient de frottement visqueux.

$C_T = C_{em} + C_{mec}$ : Couple totale de l'éolienne (N.m).

$C_{em}$  : Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple  $C_{em}$  a un signe négatif.

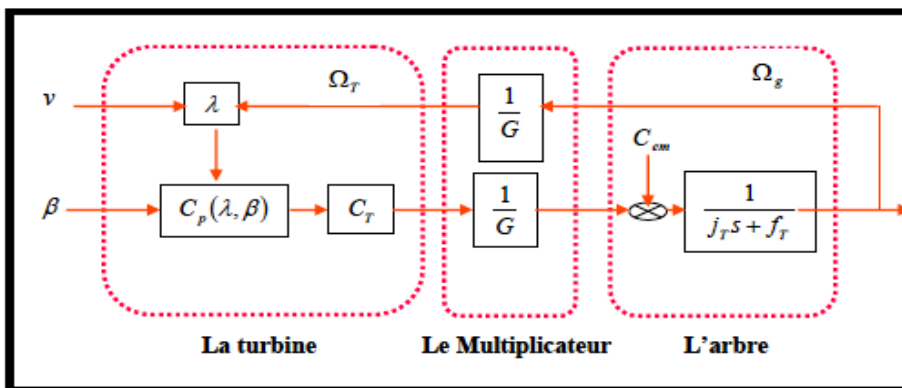


Figure.II.4 Modèle de la turbine éolienne

### II.3.1.3 Modélisation de la génératrice Asynchrone à Double Alimentation:

Dans cette partie on a utilisé la modélisation de Machine asynchrone à double alimentation, et aussi la modélisation de Park. Et les différentes équations du modèle de la GADA [15].

#### II.3.1.3.1 Modèle mathématique de la GADA à vide :[16]

Avant le raccordement au réseau, le générateur (GADA) fonctionne avec le modèle à vide, c'est-à-dire le courant est zéro.

$$i_{ds} = 0, i_{qs} = 0 \quad (2.10)$$

Les équations de tension et de flux de la GADA a vide exprimée par :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi \\ V_{sq} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \varphi \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i \end{cases} \quad (2.13)$$

Régulation de la courant rotorique avec orientation de flux statorique :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = M i_{rq} = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

La commande en puissance active et réactive de la DFIG n'est pas nécessaire à la synchronisation, le principe de commande est basé sur la régulation de la courant avec la considération des orientations du flux ( $\psi_{qs} = 0$ ), et on compte tenu du équation (2-14), on

peut alors écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = M i \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} i_{rd}^* = \varphi_{sd} / M \\ i_{rq}^* = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

Le flux statorique peut être estimé en boucle ouverte à partir de l'équation de tension statorique dans la repère  $\alpha - \beta$

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (2.17)$$

Le flux transformé dans le repère (d-q) à travers de la matrice de rotation commet suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{s\alpha} \\ \varphi_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

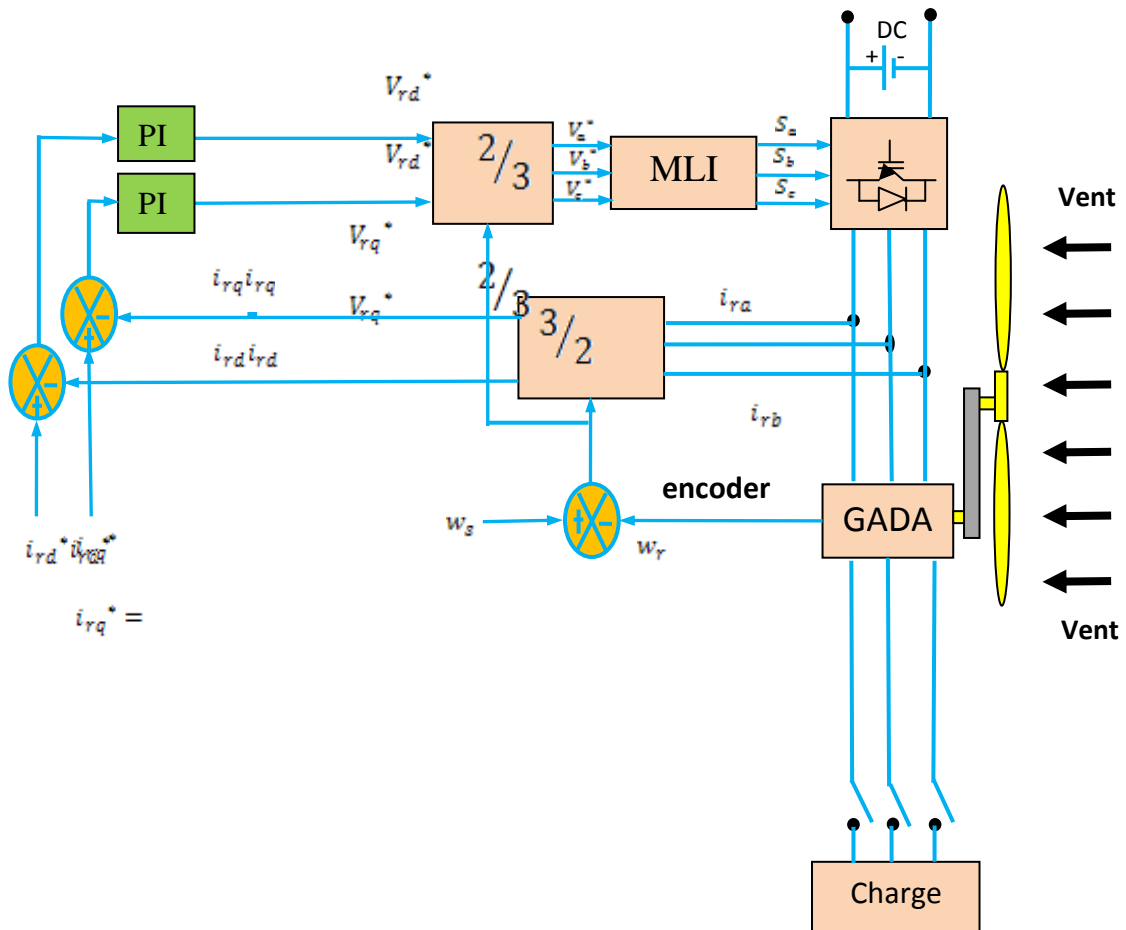


Figure II.5: Schéma de principe du système éolien dans un site isolé

### II.3.1.3.2 Modèle mathématique de la GADA en charge: [16]

Après le raccordement au réseau, le générateur (GADA) fonctionne avec le modèle en charge ,c'est-à-dire la valeur résistance statorique exprimée par :

$R_s = R_s + R_{ch}$  et la valeur de l'inductance  $L_s = L_s + L_{ch}$

Les équations de tension et de flux et le courant de la GADA en charge:

$$\begin{cases} V_{ds} = (R_s + R_{ch})I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = (R_s + R_{ch})I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = M_s i_{dr} \\ \varphi_{qs} = M_s i_{qr} \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.22)$$

Régulation de la courant rotorique avec orientation de flux statorique  $\varphi_r$  :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = M_s i_{dr} \\ i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

$$\begin{cases} i_{dr}^* = \varphi_{ds} / M \\ i_{qr}^* = 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

le flux statorique peut être estimé en boucle ouverte à partir de le équation de tension statorique dans la repère  $\alpha - \beta$

$$\begin{cases} \varphi_{\alpha s} = \int (V_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) dt \\ \varphi_{\beta s} = \int (V_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) dt \end{cases} \quad (2.25)$$

Le flux transformé dans le repère (d-q) à travers de la matrice de rotation commet suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{\alpha s} \\ \varphi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

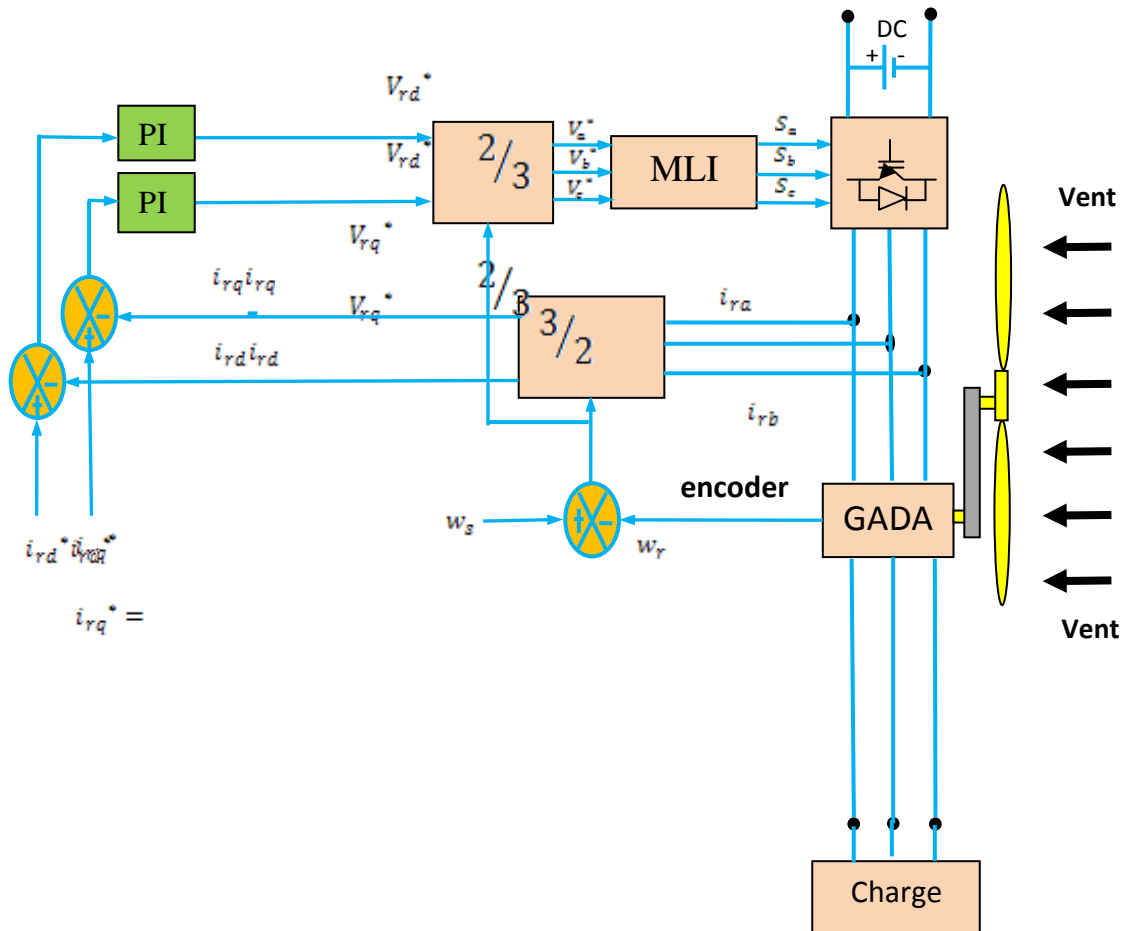


Figure II.6: Schéma de principe du système éolien avec charge isolée.

**II.3.1.3.3 Système de génération DFIG autonome :**

Le système que nous allons étudier est illustré dans la Figure II.7 ,Dans notre configuration le système fournit de l'énergie électrique à l'aide d'un système éolien pour alimenter l'onduleur dans le temps de démarrage de GADA.

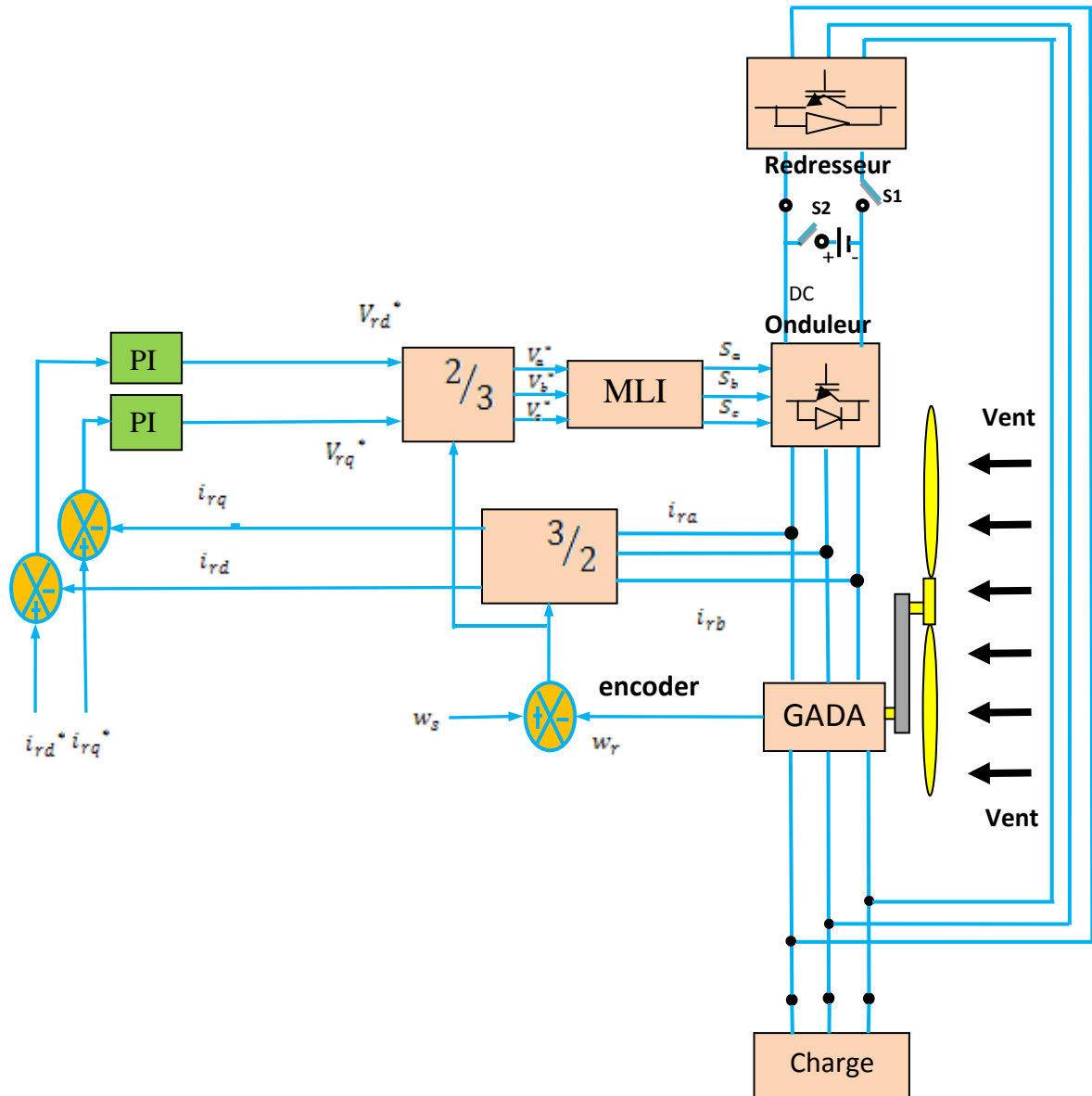


Figure II.7: Schéma de système éolienne avec GADA autonome.

### II.3.2 Modélisation d'un système photovoltaïque:

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle  $R_p$  caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle [6].

II.3.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent de la cellule solaire réel pour un flux incident et une température fixe, est le suivant :

En appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds :

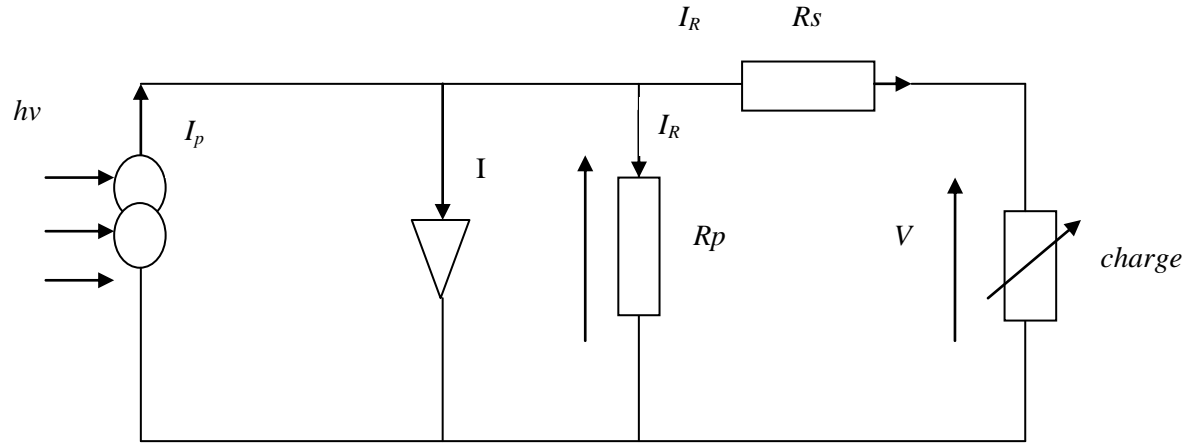


Figure II. 8: schéma électrique équivalent d'une cellule PV

$$I = I_{ph} - I_D - I_{RP} \tag{2-27}$$

Le courant débité par la cellule est la somme algébrique de trois courants :

$I_{ph}$  : photo courant indépendant de V (ou de  $R_s$ ), il est proportionnel au flux incident (taux de génération –recombinaison) et aux longueurs de diffusion des porteurs:

$$I_{ph} = qg (L_n + L_p) \tag{2-28}$$

$I_{RP}$  : courant traversant  $R_p$ , si  $R_p$  est très grande, il devient très faible est indépendant de la tension :

$$I_{RP} = \frac{V_p}{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{2-29}$$

$$\text{car } V_D = R_p I_{RP} = V + R_s I$$

$I_D$  : courant de diode, il est de même ordre de grandeur que  $I_{RP}$  pour les faibles tensions et il devient très grand au voisinage de  $V_{CO}$ , il s'écrit sous la forme:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1 \right) \tag{2-30}$$

Remplaçons dans (2-28) les équations (2-29), (2-30) , l'équation caractéristique devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ e^{\frac{q}{AKT}(V+R_s I)} - 1 \right] \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (2-31)$$

A : facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des mécanismes de recombinaison dans la zone de charge d'espace .pour les cellule actuellement commercialisées au silicium : A=1

La représentation graphique de la formation I=f (V) donnée par la figure suivant :

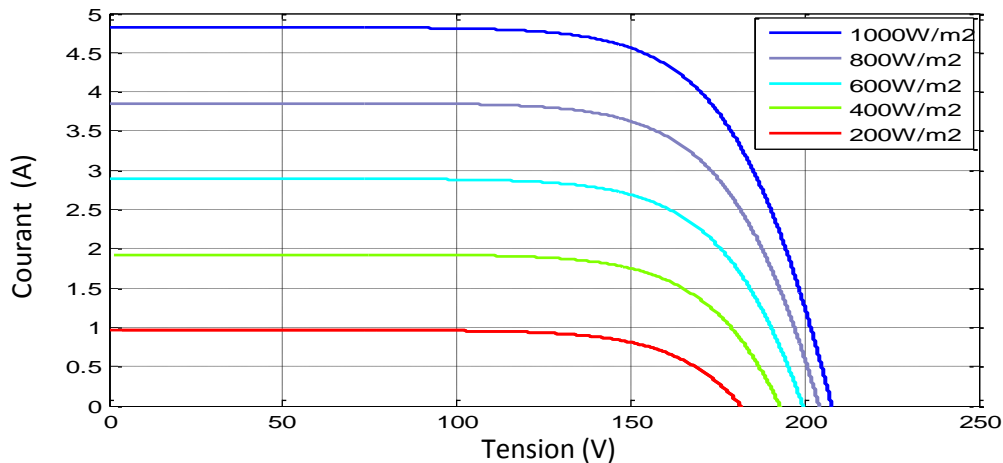


Figure II.9: Caractéristique d'un panneau photovoltaïque

### II.3.2.2 caractéristiques I=f (V) d'une cellule photovoltaïque :

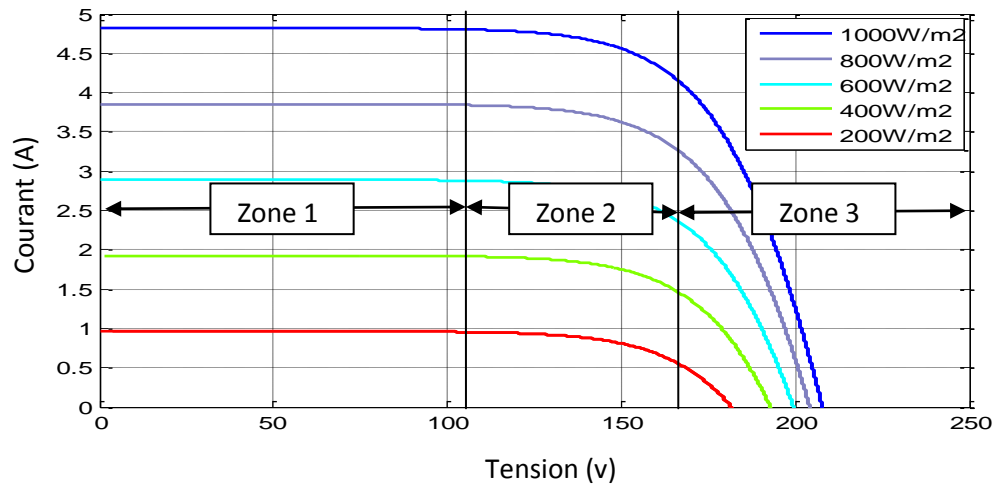
La caractéristique I=f(V) représente la courbe de puissance ,sachant que le courant généré est donné par la formule (2-31) et que la cellule fonctionne sous un éclairé fixe et une température constante T. selon la valeur de RC (résistance de charge ; on distingue trois zones de fonctionnement.

La figure (II.10) représente trois zones essentielles [6] :

**a) La zone (1) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région Le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

**b) La zone (2) :** correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire Entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du Générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

c) **La zone (3)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une Tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.



*Figure II.10: Différentes zones de Caractéristique I(V) entre générateur et module Photovoltaïque*

### II.3.2.3 Paramètres électriques du module photovoltaïque

Les différents paramètres caractérisant un module photovoltaïque sont la tension de circuit ouvert, courant de court-circuit, puissance maximale, facteur de forme et rendement. Ils sont extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer les différents modules éclairés dans des conditions identiques.

#### II.3.2.3.1 Tension de circuit ouvert :

Si on place un module sous une source lumineuse constante sans aucune circulation de courant, on obtient à ses bornes une tension maximale continue, dite tension à circuit ouvert  $V_{C0}$ .

$$V_{C0} = N_S * 0.6V \quad (2-32)$$

Où 0.6V est la tension pour une cellule PV élémentaire et  $N_S$  est le nombre de cellules. On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes du module PV [17].

#### II.3.2.3.2 Courant de court-circuit :

Lorsqu'on place le module PV en court-circuit, il débite son courant maximal à tension nulle. On dit courant de court-circuit  $I_{cc}$ . On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes du module. Dans les modules PV au silicium, le courant est de l'ordre de 12mA/cm<sup>2</sup> [17].

### II.3.2.3.3 Puissance maximale :

La puissance fournie au circuit extérieur par un module photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes du module). Cette puissance est maximale (notée  $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement  $P_{max}$  ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ) de la courbe Courant-Tension.

$$P_{max} = I_{opt} V_{opt} \quad (2-33)$$

### II.3.2.3.4 Facteur de forme :

On appelle facteur de forme  $ff$  le rapport entre la puissance maximale fournie par le module  $P_{PVP_{max}}$  ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ), et le produit du courant de court-circuit  $I_{CC}$  par la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  (c'est à dire la puissance maximale d'un module idéal).

$$ff = \frac{I_{opt} V_{opt}}{I_{cc} V_{co}} = \frac{P_{max}}{I_{cc} V_{co}} \quad (2-34)$$

Le facteur de forme indique la qualité du module; plus il s'approche de l'unité plus le module est performant, Il est de l'ordre de 0.7 pour les modules performants ; et diminue avec la température [17].

### II.3.2.3.5 Rendement :

Le rendement énergétique d'un module PV est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par le module  $P_{max}$  ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ) et la puissance solaire incidente. Il est donné par :

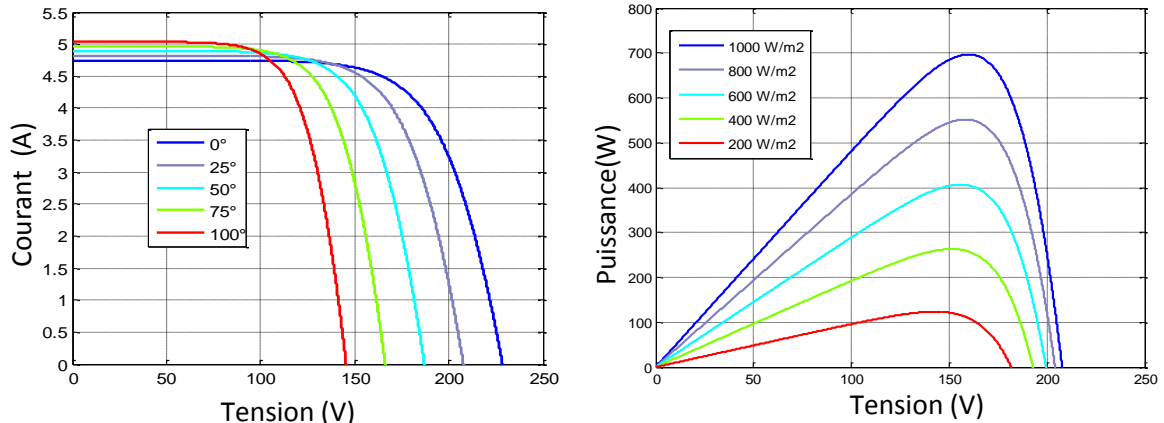
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{P_{inc}} \quad (2-35)$$

Avec  $P_{inc}$  est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale du module Pv. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

### II.3.2.4 Influence des différents paramètres :

#### II.3.2.4.1 Influence de l'éclairement :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. La Figure(II.11) décrit le comportement du module sous un éclairement fixe de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ .

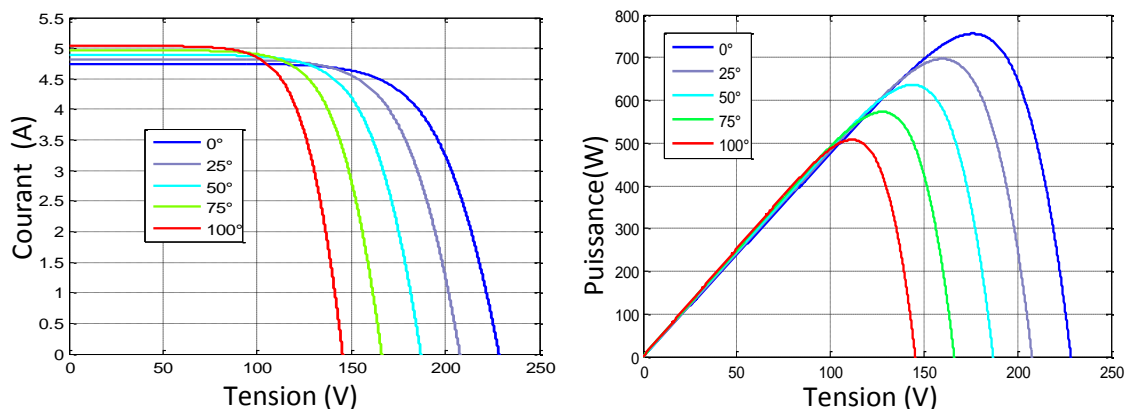


**Figure. II.11:** Influence de l'éclairement sur les caractéristiques  $I(v)$  et  $p(v)$  à  $1000\text{w}/\text{m}^2$

Comparant avec les caractéristiques données par le constructeur, nous déduisons un bon accord entre les caractéristiques réelles (expérimentales) et celles déduites par simulation sous MATLAB. Pour chacun de différents éclairements correspond une puissance maximale que pourrait fournir le panneau, notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à la diminution du flux lumineux. Aussi nous remarquons que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement.

#### II.3.2.4.2 Influence de la température :

Dans la figure (II.12), nous représentons les résultats concernant les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  du module à  $25^\circ\text{C}$  obtenus pour divers valeurs de l'éclairement.



**Figure. II.12:** Influence de la température sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  à  $T=25\text{ C}^\circ$

Nous remarquons que le courant augmente avec la température; par contre la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible donc le rendement de module diminue aussi.

### II.3.2.5 Modélisation de la hacheur survolteur:[4]

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source.

#### II.3.2.5.1 Principe de fonctionnement :

La figure (II.13) représente le principe de fonctionnement d'un hacheur survolteur qui est utilisé pour :

- adopté le niveau de tension.
- fait fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximale.

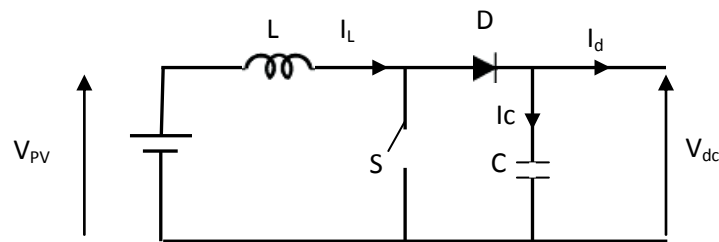


Figure. II.13 : Schéma électrique du convertisseur

La modélisation de ce convertisseur basé sur l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande S.

Comme résultats, on a deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

- Lorsque (T) est fermé:

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2-36)$$

$$0 = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (2-37)$$

- Lorsque (T) est ouvert:

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad (2-38)$$

$$I_L = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (2-39)$$

En posant : - (S =1) pour T est fermé

- (S =0) pour T ouvert.

Nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - S) \quad (2-40)$$

$$(1 - S)I_L = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (2-41)$$

### II.3.2.6 Principe de fonctionnement de MPPT :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure (II.14) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

La Figure (II.14) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension.

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [18].

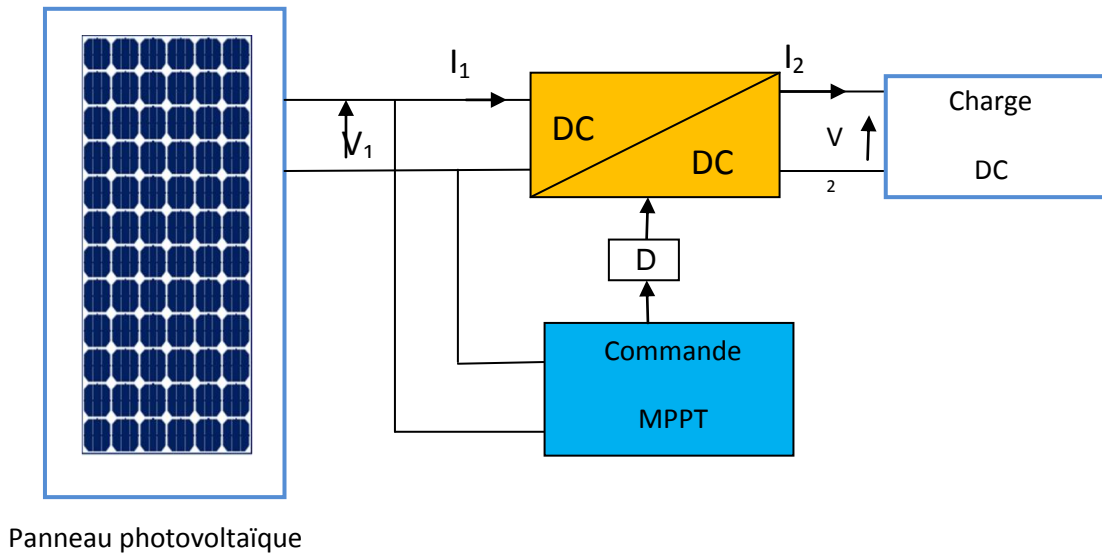


Figure. II.14: Système photovoltaïque avec MPPT

### II.3.2.7 Méthode de la perturbation et l'observation (P&O) :

La méthode perturbation et observation 'P&O', est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée.

La figure 15 montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', la tension et le courant  $V$  et  $I$ , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante  $P(k)$ . Cette valeur  $P(k)$  est comparée à la valeur  $P(k-1)$  de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle [19][20].

- ✓ Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint,  $V$  oscillera autour de la tension idéale  $V_{mp}$  de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur d'une perturbation simple  $\Delta D$ .
- ✓ Si  $\Delta D$  est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.

- ✓ Si  $\Delta D$  est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation [19].

La valeur  $\Delta D$  idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement,

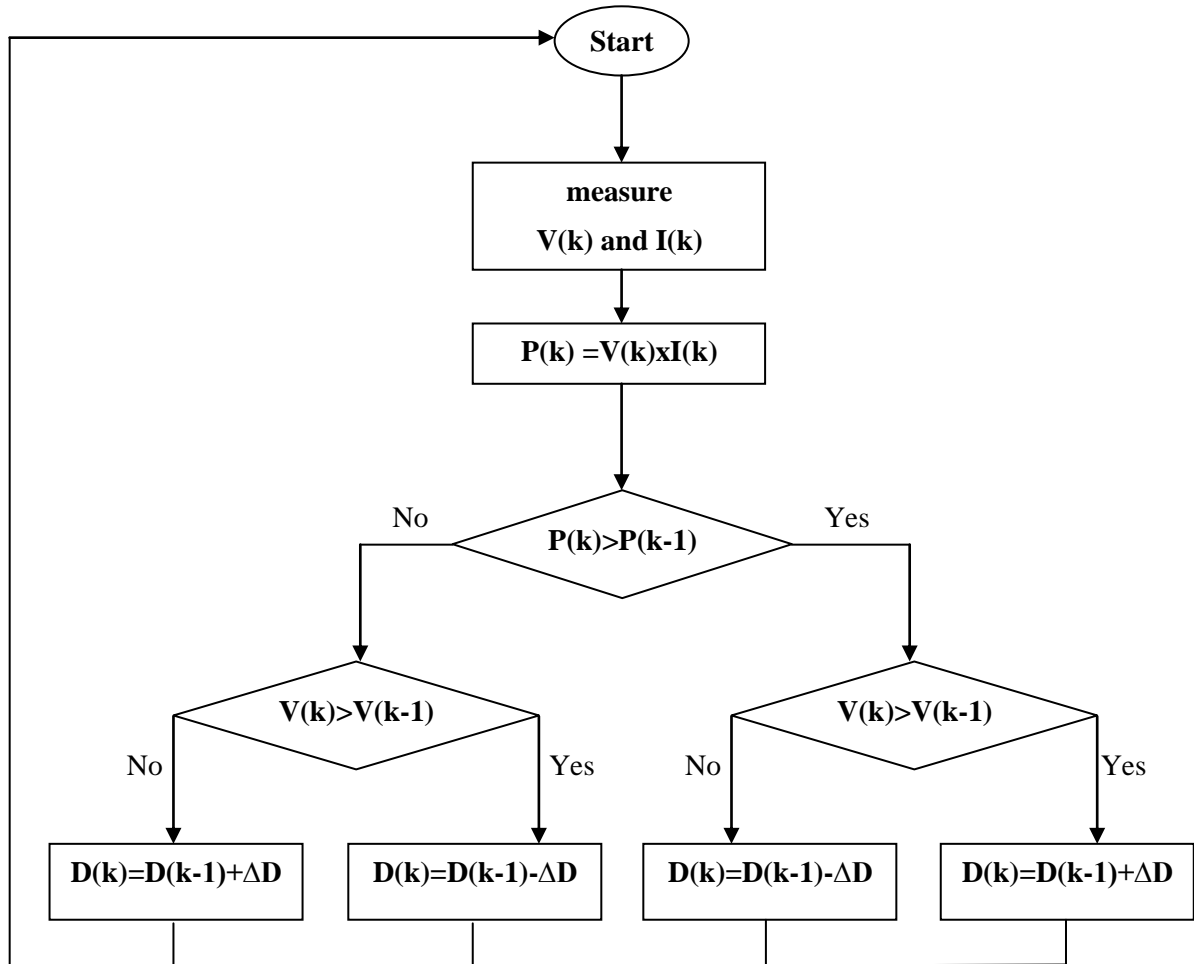


Figure. II.15: Organigramme d'algorithme MPPT ( P&O)

### II.3.3. Contrôle vectoriel du redresseur MLI :

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de la connexion du convertisseur côté réseau, avec le réseau électrique via le filtre RL, nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les expressions suivantes :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_a - V_{an} \\ V_b - V_{bn} \\ V_c - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$C \frac{dV_c}{dt} = i_a S_a + i_a S_a + i_a S_a - idg \quad (2-43)$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons:

$$\begin{cases} V_d = R.i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_s Li_{qr} \\ V_q = R.i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_s Li_{dr} \end{cases} \quad (2-44)$$

Le découplage entre l'axe d et q est réalisé par le variable  $h_d$  et  $h_q$  :

$$\begin{cases} h_d = e_d - \omega_s Li_{qr} - V_d = R.i_d + L \frac{di_d}{dt} \\ h_q = e_q + \omega_s Li_{dr} - V_q = R.i_q + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (2-45)$$

Il est possible de commander indépendamment les composants du courant  $i_d$  et  $i_q$  par action sur  $h_d$  et  $h_q$ , ainsi, il est simple de dimensionner les régulateurs.

La PLL sert essentiellement pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park de la phase équivalente d'un système triphasé. La PLL réalise la suivre de phase de la composante directe de la tension du réseaux  $e_d$ , afin d'éliminer la composante en quadrature,  $e_q$ , ce qui se produit lorsque la phase estimée,  $\theta_g$ , est égale à la phase du réseau.

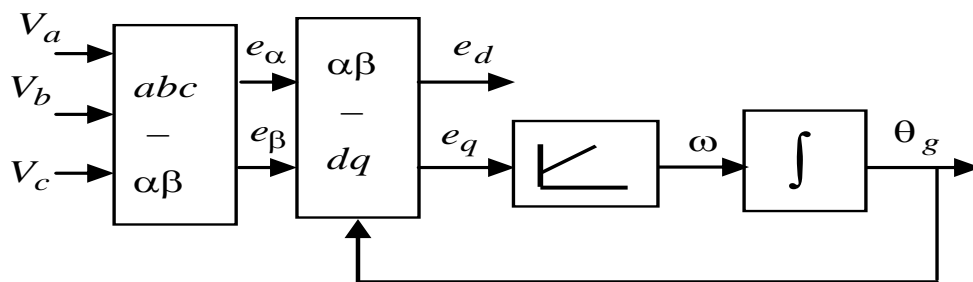


Figure. II.16: Structure classique d'une PLL triphasée.

Le système de commande conventionnel utilise la commande en boucle fermée du courant dans le système de coordonnées tournant, commande à tension orientée (VOC) est montrée dans la figure II.17.

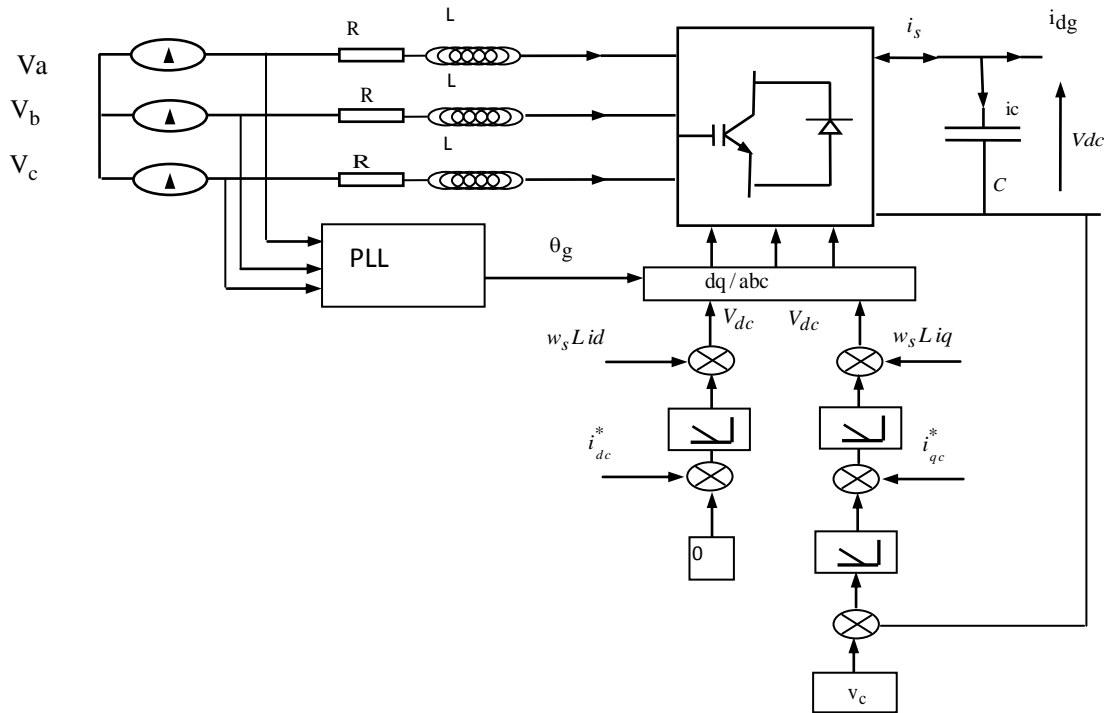


Figure. II.17: structure du redresseur avec régulateur de la tension redressée

### II.3.4 Modélisation de l'onduleur [21]:

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors, ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées.

Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur MLI utilisée dans les travaux de Salma El Aïmani [22], qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT commandés par la modulation de largeur d'impulsions.

Pour simplifier l'étude supposons que:

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ,c-a-d  $K_{ci} (c \in [1,2,3], i \in [1,2])$
- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Un onduleur de tension est donné par la figure (II.18).

On a, donc :

$I_{Kci}=0$  ,  $V_{Kci} \neq 0$ ; Interrupteur ouvert,

$I_{Kci} \neq 0$  ,  $V_{Kci} = 0$  ; Interrupteur fermé.

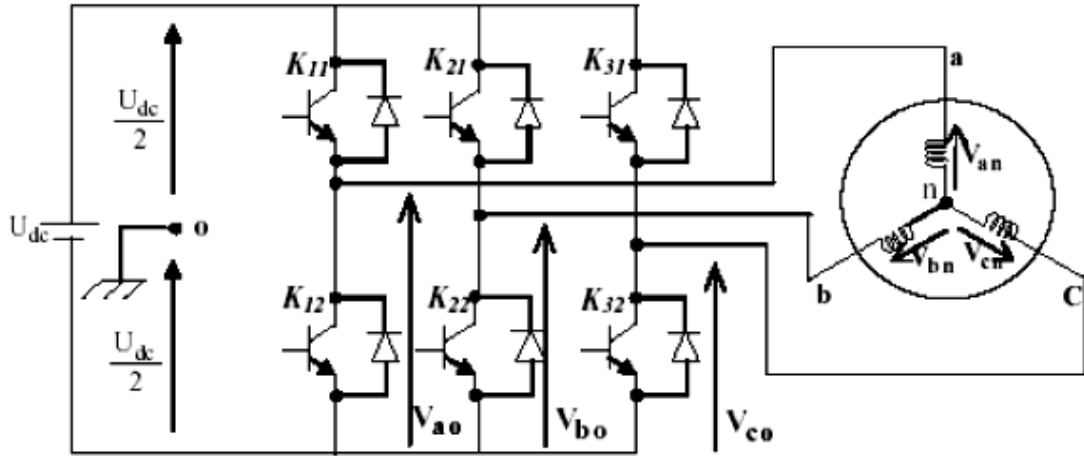


Figure II.18 : Schéma d'un onduleur de tension

Les tensions composées  $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$  sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (2-46)$$

$V_{ao}, V_{bo}, V_{co}$  sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues.

Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles, comme suites :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2-47)$$

sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives),

$V_{no}$  est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Du système  $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$  équilibré découle la relation suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2-48)$$

La substitution de (2 -48) dans (2 -47) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2-49)$$

En remplaçant (2 -49) dans (2 -47) , on obtient :

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\
 V_{bn} &= -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\
 V_{cn} &= -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co}
 \end{aligned} \tag{2-50}$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu- alternatif.

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \tag{2-51}$$

#### II.4Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles mathématiques du système hybride(DFIG-PV), composé le photovoltaïque et d'un générateur asynchrone double alimentation.

Nous commençons par la modélisation des éoliennes, où nous étudions une série de turbines à vent, puis a donné un modèle mathématique qui tient compte, nous avons brièvement la moitié du modèle de disque convertisseur (onduleur + hacheur) .

Ainsi que la modélisation dynamique du comportement énergétique dans les chaînes. Et enfin le modèle mathématique équivalent au panneau photovoltaïque pour étudier et analyser l'effet des paramètres externes sur leur fonctionnement.

Dans le chapitre suivant, nous testons la simulation de ce système hybride en plus de donner les résultats obtenus grâce à ce processus.

## Chapitre III :

Simulation d'un système  
hybride éolien- photovoltaïque

**III.1 Introduction :**

Le modèle de simulation de composant du système hybride illustré. Ce modèle de simulation peut être utilisé de manière modulaire, ce qui permet d'adapter le modèle aux objectifs des simulations. Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les bases qui ont permis de développer sous l'environnement MATLAB/Simulink.

On commence par le système éolien à base de GADA autonome, on suit ont en intégré le système photovoltaïque pour l'alimentations de d'onduleur .

Les paramètres des composants du système hybride sont donnés dans l'Annexe .

**III.2 Système éolienne Autonome :**

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans des gammes de puissances de quelques dizaines de KW pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour le camping ou les stations météo. les machines de plus forte puissance sont utilisées pour la production les énergie électrique des chalets isolés ou encore des villages.

Les points connus entre toutes ces productions éoliennes sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie.

L'éolienne charge les batteries par la tension continue produite soit directement par une génératrice à courant continu pour les plus faibles puissances, soit par une génératrice de type synchrone, à aimants ou bobinée, via un pond redresseur et une électronique plus ou moins élaborée pour régulateur charge.

La tension continue des batteries est ensuite utilisée soit directement pour de l'éclairage en tension continue ou alors mise en forme par un onduleur pour obtenir une alimentation sinusoïdale 50Hz permettant l'utilisation de tous les appareils électriques *classiques*.

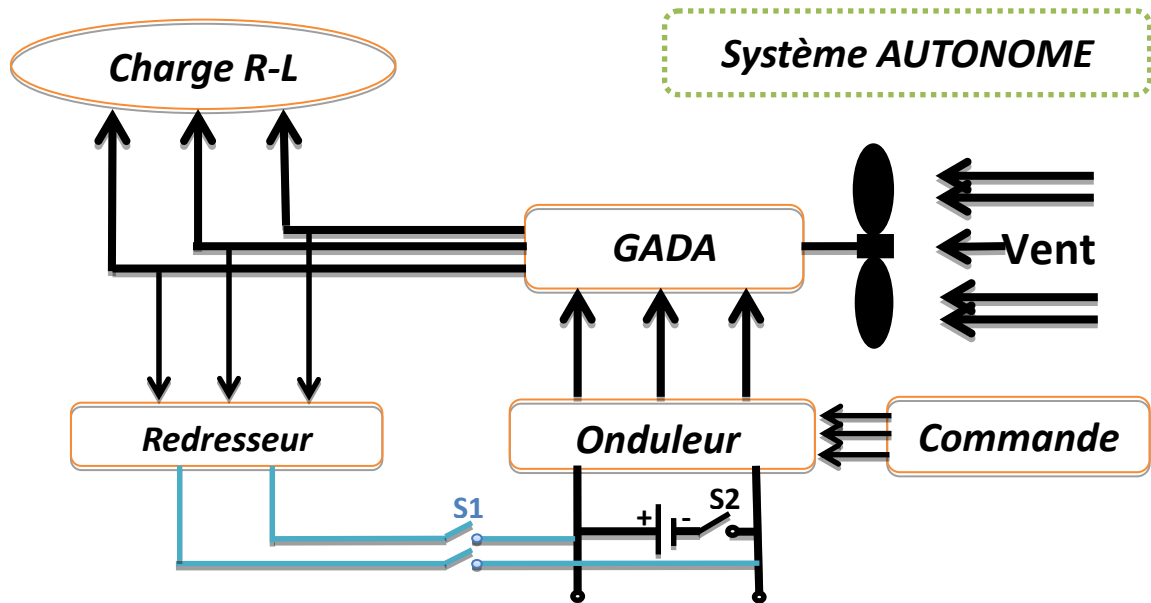


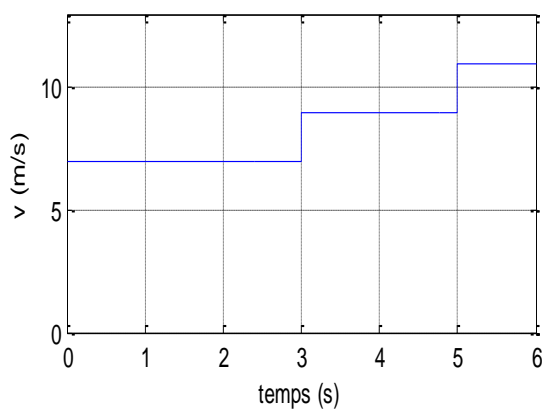
Figure III.1. Système éolienne autonome avec GADA .

### III.2.1 Simulation de la GADA fonctionnement autonome en charge ( $R=0.1 \Omega$ $L=20$ H) :

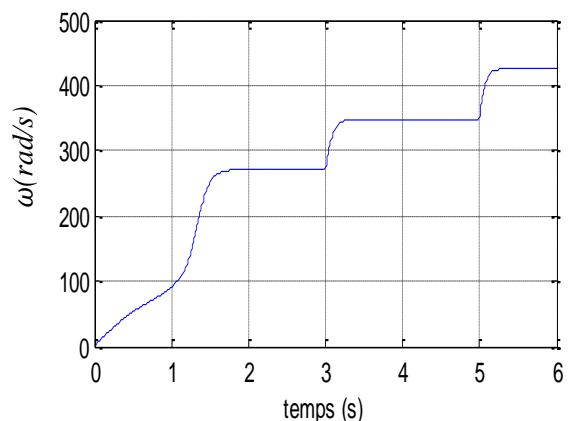
Dans ce cas, les performances du système sont indiquées sous une charge linéaire triphasé (RL) et vitesse du vent variable , Dans notre configuration le système utilise l'énergie électrique à l'aide d'un système batterie de (540 V) pour alimenter l'onduleur dans le temps de démarrage la GADA, a l'instant  $t=0.4s$  en fermé l'interrupteur de la redresseur et ouvrir l'interrupteur de batterie pour la fonctionnement autonome.

Les tests ont été appliqués au système fonctionnement à vitesse du vent variable avec contrôle MPPT, Dans cet essai, un vent de variable de 7m/s jusque 11m/s appliqué sur les pales de la turbine éolienne .

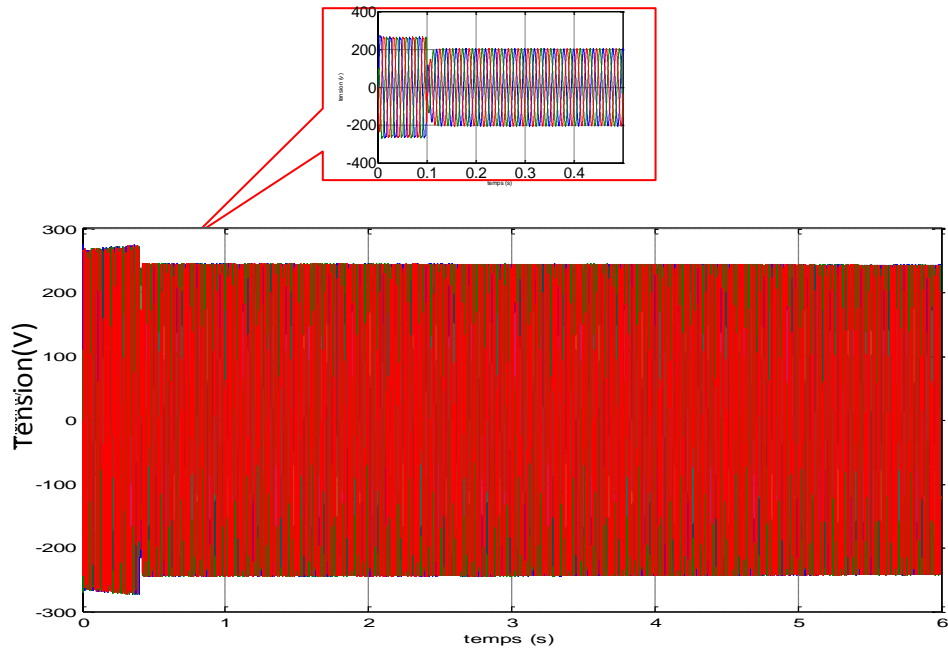
#### ✓ Résultats de simulation :



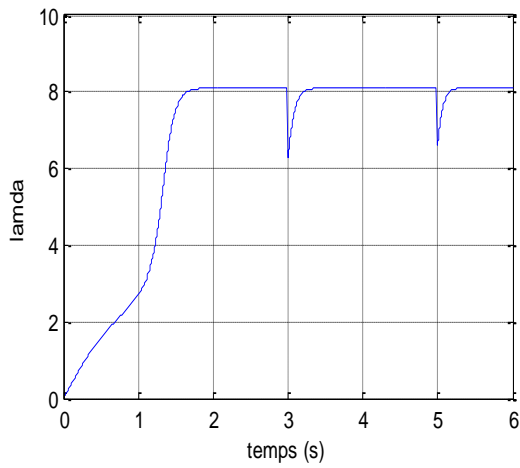
a) Vitesse du vent



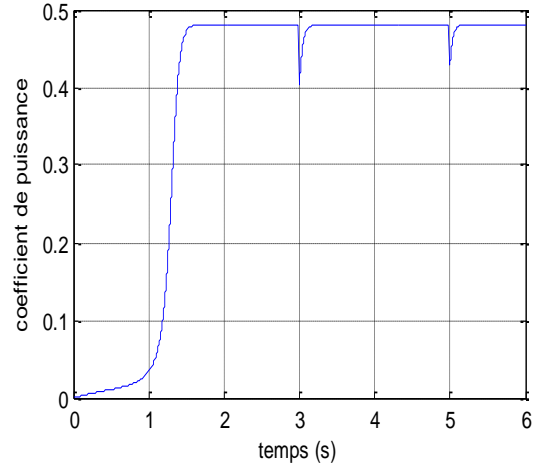
b) Vitesse de rotation



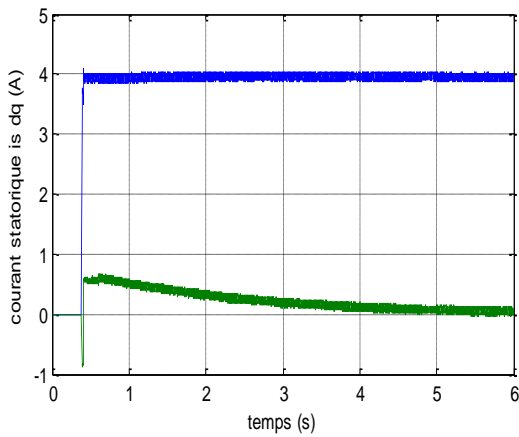
c) Tension statorique (v)



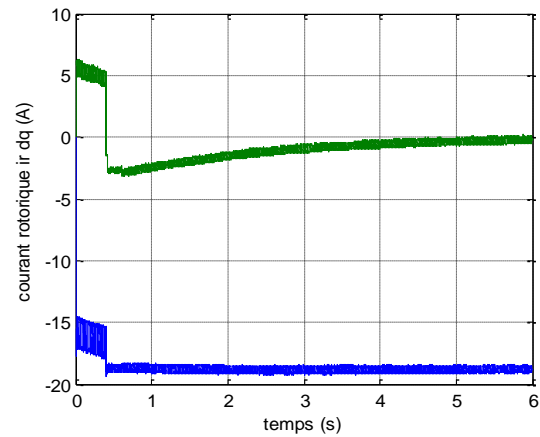
d) Vitesse spécifique lamda



e) Coefficient de puissance Cp



f) Courant statorique sur l'axe dq(A)



g) Courant rotorique sur l'axe dq(A)

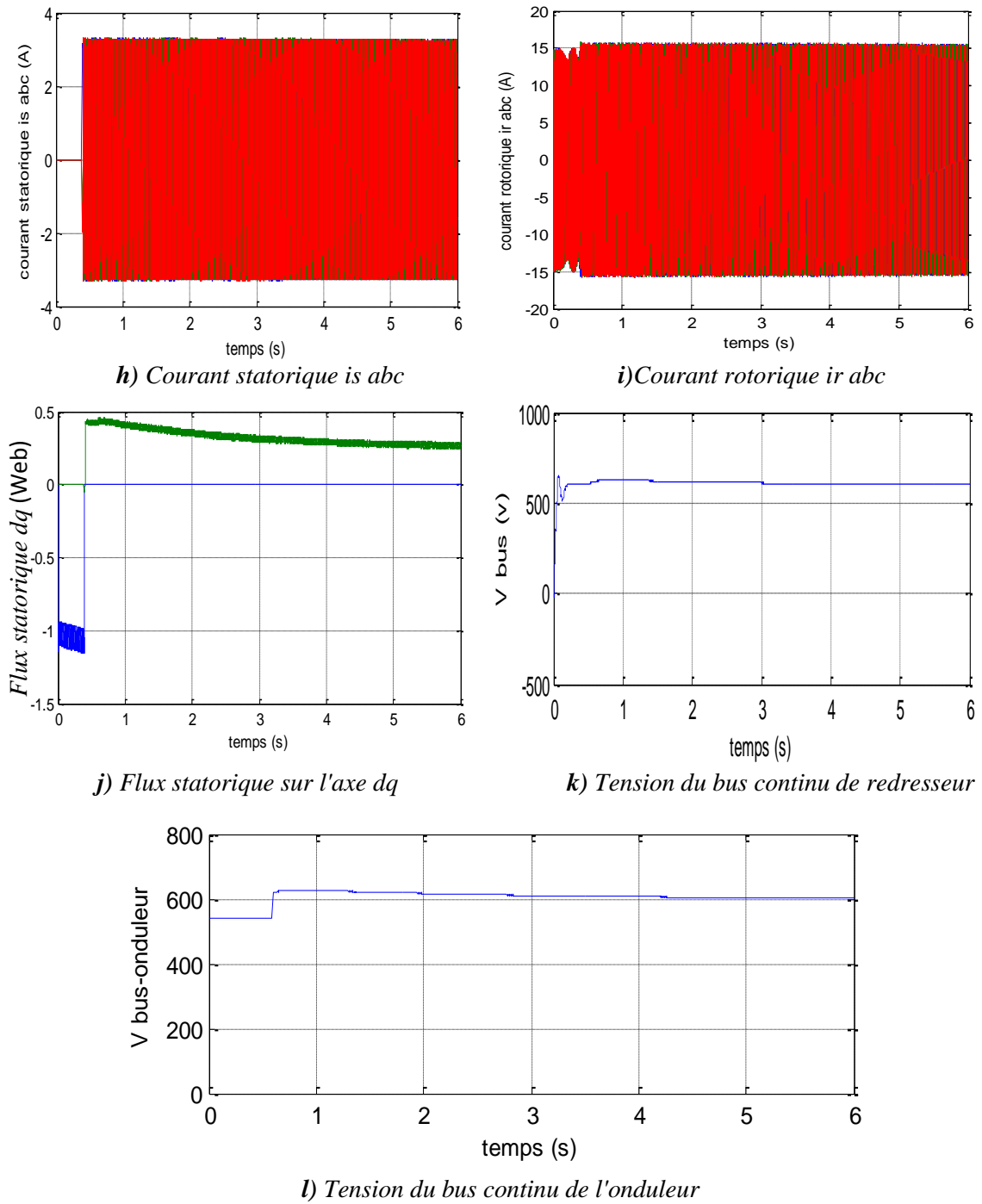


Figure III.2. Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de DFIG autonome.

- **Interprétations des résultats**

D'après les résultats obtenus on remarque que, la GADA reliée à la turbine fonctionne à une vitesse variable qu'il n'influencer pas sur la tension générée.

Et le découplage entre les courants statorique et rotorique sur dans l'axe d-q est clairement montré

La vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 8.1 et 0.49 successivement, avec la puissance éolienne capturée sa référence optimale.

Nous remarquons la stabilité la tension du bus continu suit bien sa référence qui est 600V. Les courants statoriques ( $i_{abc}$ ) et les courants rotoriques ( $i_{r abc}$ ) sont des formes quasi-sinusoidales.

### III.3 Système hybride éolien- photovoltaïque :

Dans le système d'énergie hybride (SEH), les adaptateurs sont souvent utilisés pour charger les batteries de stockage. Pour convertir CC en AC et vice versa. Nous avons souvent trois types rencontrés dans le SEH: redresseurs, onduleurs et hacheur, Composants de la procédure de conversion AC / DC, qui sont souvent utilisés pour charger les batteries.

Mais dans cette étude, nous avons utilisé le panneau solaire pour alimenter GADA et en même temps charger les batteries et cela nous assure de système autonome.

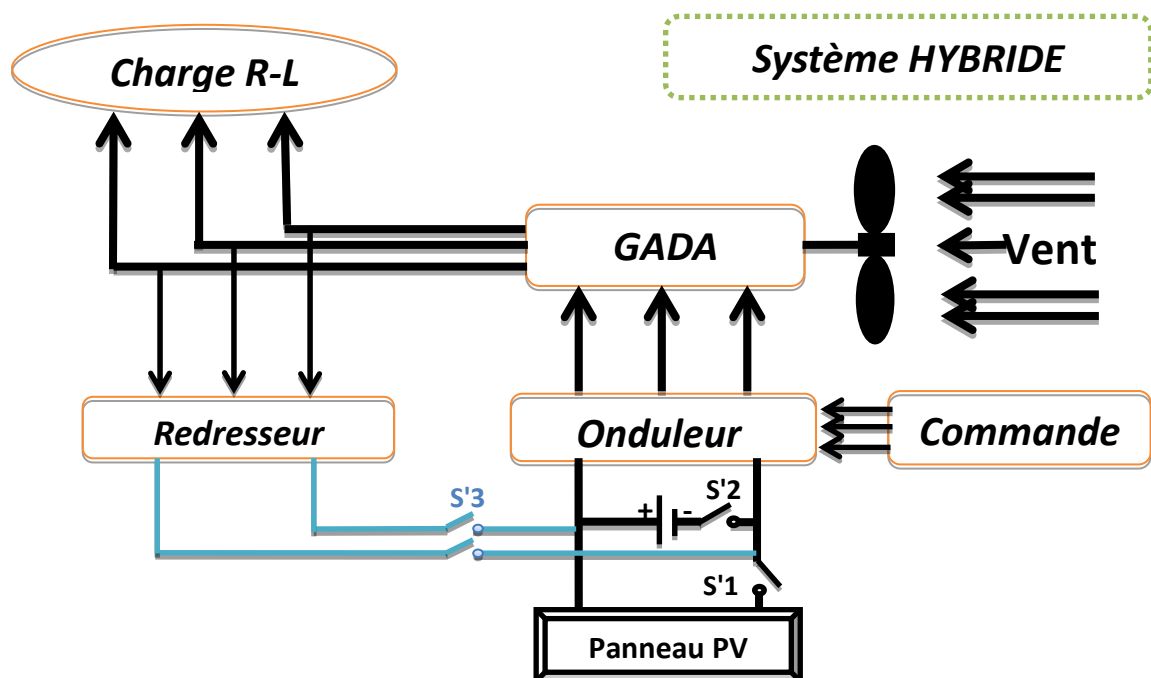


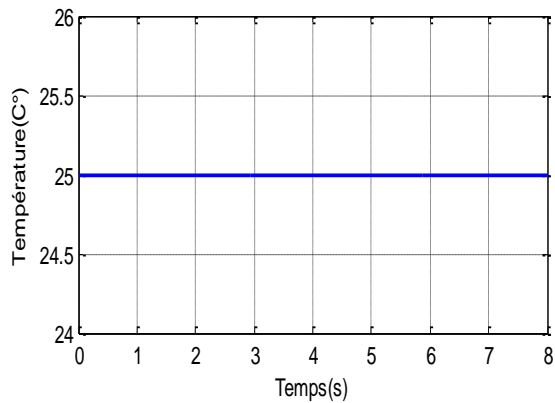
Figure III.3. Système hybride éolien- photovoltaïque avec GADA .

### III.3.1 Simulation d'un système hybride éolien- photovoltaïque:

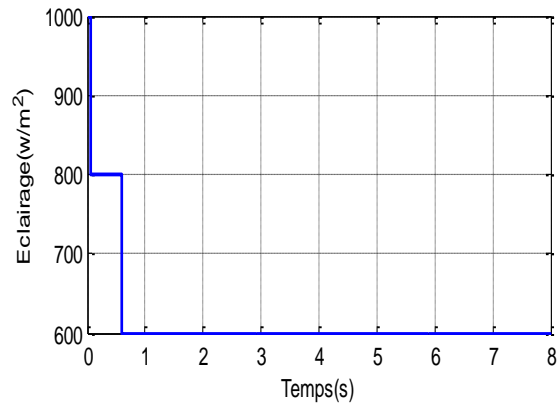
En utilisant le module photovoltaïque AEG.40 avec un hacheur Boost avec la méthode la perturbation et l'observation (P&O). L'objectif fixé dans ces simulations est d'atteindre une tension suffisamment pour alimenter le onduleur (coute rotor de la GADA), la technique de la commande vectorielle assure une tension stable au niveau de la charge , où le stator de la machine lie a une charge triphasée équilibrée de type R-L ,

Afin de pouvoir tester cette chaîne, une variation de la vitesse de vent et l'éclairement appliqué sur le système.

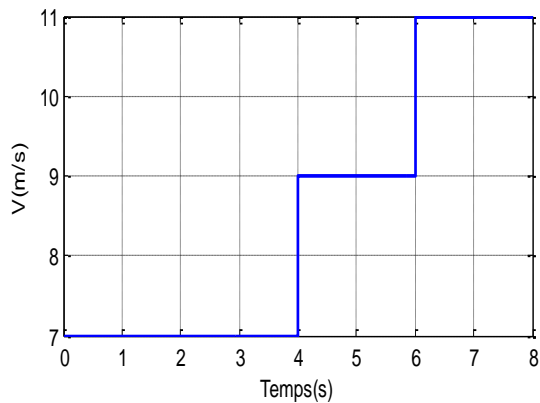
#### ✓ Résultats de simulation :



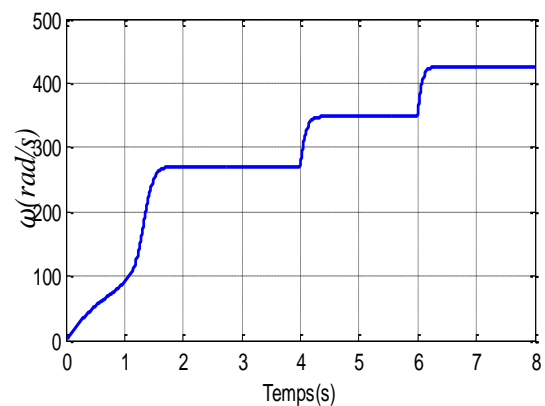
*a) Température appliqué sur du panneau*



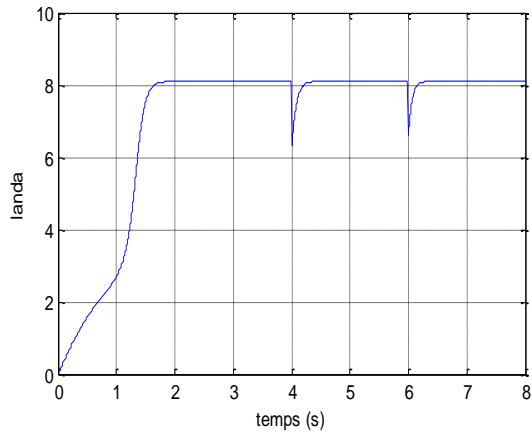
*b) Eclairage appliqué sur du panneau*



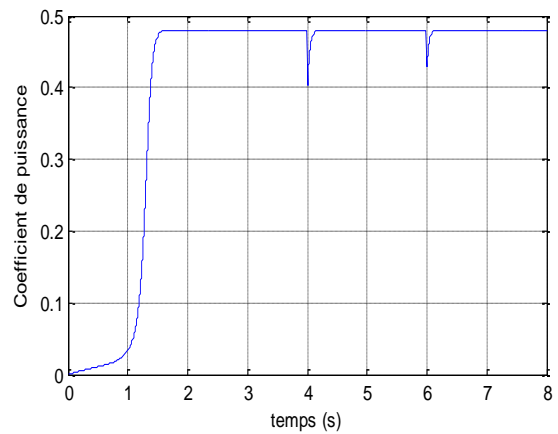
*c) Vitesse de vent*



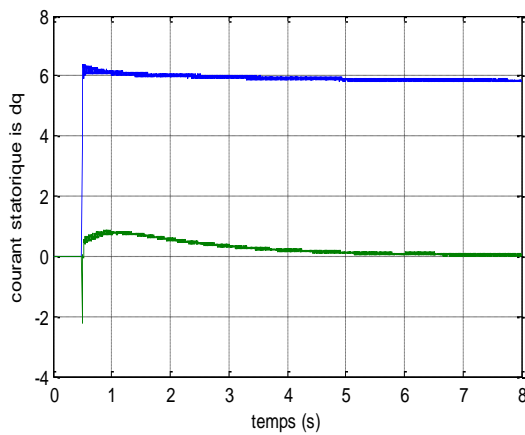
*d) Vitesse de rotation*



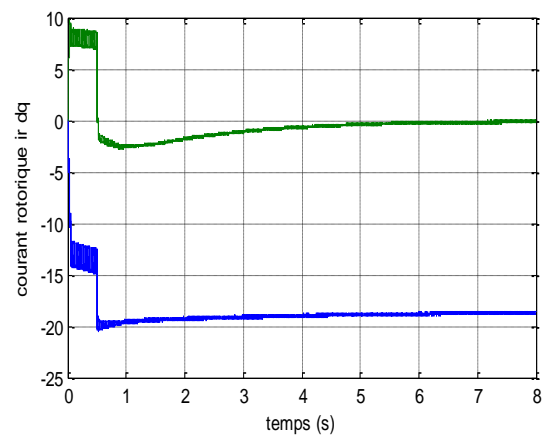
*e) Vitesse spécifique  $\lambda_{da}$*



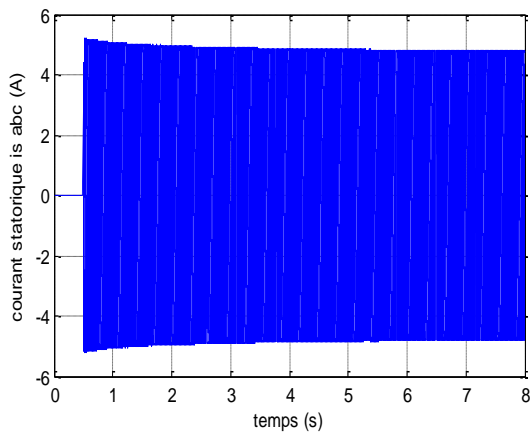
*f) Coefficient de puissance  $C_p$*



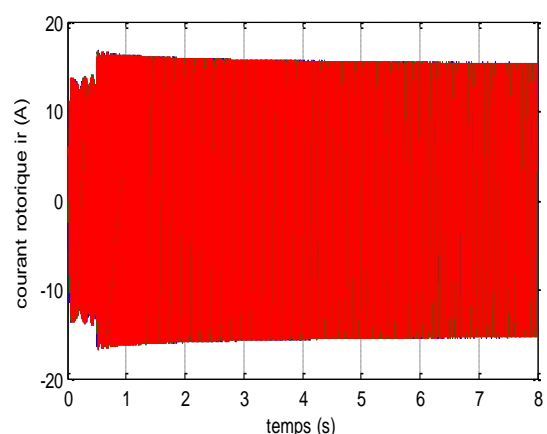
*g) Courant statorique l'axe  $dq(A)$*



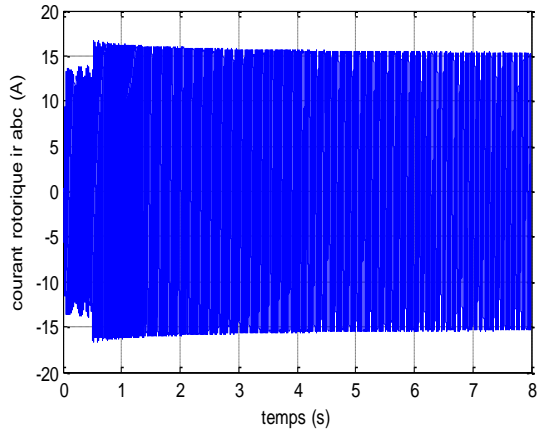
*h) Courant rotorique l'axe  $dq(A)$*



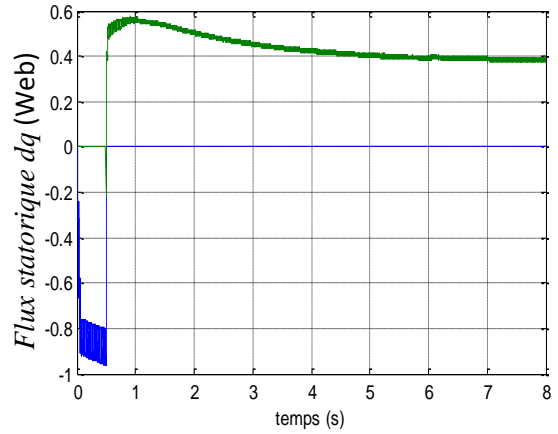
*i) Courant statorique  $i_{s abc}(A)$*



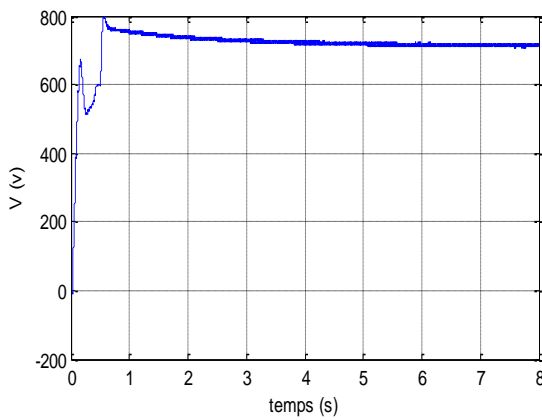
*j) Courant rotorique  $i_r(A)$*



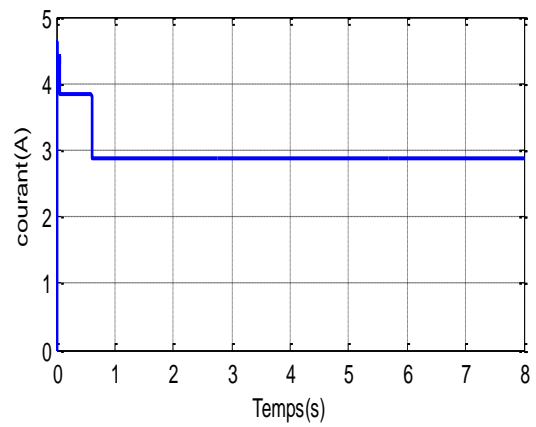
**k) Courant rotorique ir abc**



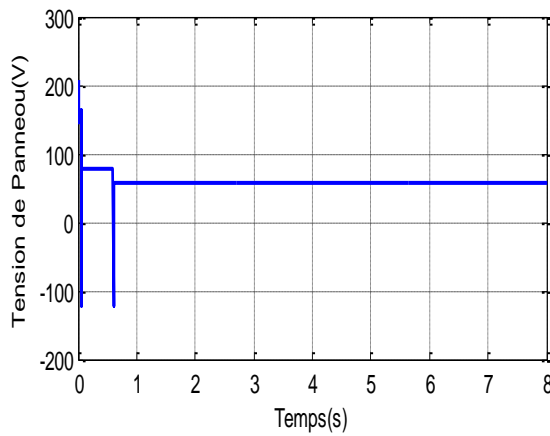
**l) Flux statorique sur l'axe dq**



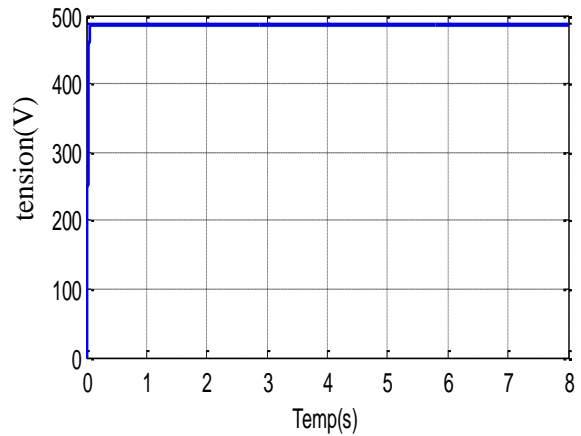
**m) Tension de de sortie du hacheur- PV**



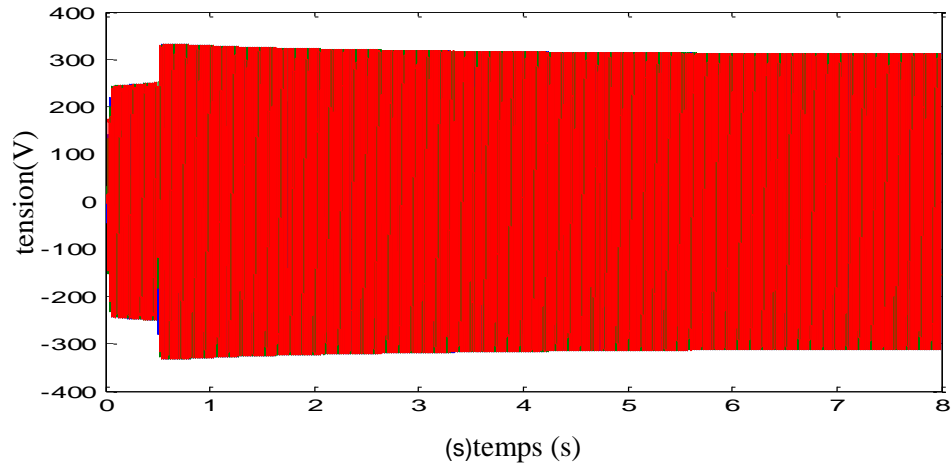
**n) Courant de PV**



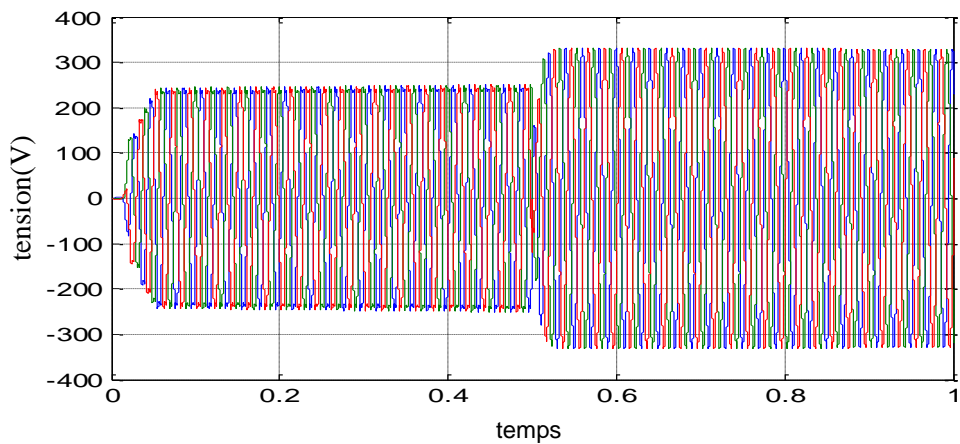
**o) Tension de sortie du PV**



**p) Tension de sortie redresseur**



q) Les tensions simples statorique



r) Zoom de Tension (V)

Figure III.4 Résultats de simulation d'un système hybride et autonome (DFIG-PV)

- **Interprétations des Résultats :**

Nous allons analyser d'abord le comportement dynamique du système hybride soumis à des variations climatiques (vent et éclairage), Pour cet essai, la vitesse du vent varie de 7 m/s à 9 m/s puis à 11 m/s. et le comportement du module photovoltaïques teste à température constante et éclairage variable ( $1000\text{W} / \text{m}^2$ ,  $800\text{W} / \text{m}^2$ ,  $600\text{W} / \text{m}^2$ ).

Les figures III-4. montrent un bon fonctionnement du système *DFIG – PV* .

on peut remarquer les points suivants.

- Nous constatons que la vitesse de la machine électrique suit bien la vitesse optimale liée à la vitesse instantanée du vent.
- les boucles de régulation redresseur agissent proprement en maintenant le bus continu ( bus V ) à sa valeur de référence ,

- une bonne qualité de l'énergie électrique fournie sur le stator, équilibrée et bien sinusoïdale.
- Durant cet essai, la tension de sortie du hacheur- PV reste constante, ce qui montre un excellent comportement du système de régulation de la tension. (Figure III-4-k)
- La vitesse du vent ne influence pas sur la tension générée, et le découplage entre les courants statorique et rotorique sur l'axe d-q est clairement montré
- La vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 8.1 et 0.49 successivement .

#### **III.4. Conclusion :**

Ce travail propose une nouvelle topologie de sources d'énergie hybrides (GADA-PV) pour l'alimenter une charge dans un site isolé utilisées dans le cadre d'installations électriques autonomes, c'est à dire d'installations qui ne sont pas raccordées sur le réseau de distribution d'électricité.

Après l'étude et la simulation avec des résultats présentés et commentés nous avons constaté que le système hybride à base de GADA est fonctionné stable sur toute la vitesse de vent variable.

# **CONCLUSION GENERALE**

### CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire a concerné l'étude, la modélisation et la simulation de systèmes de production d'électricité autonome, à partir de ressources renouvelables mixtes (photovoltaïque et éolienne) en utilisant la machine asynchrone double alimente fonction dans un site isolé.

A cet effet, la modélisation et la simulation numérique des deux chaînes de conversion d'électricité ont été effectuées en utilisant le logiciel MATLAB.

Notre étude s'est focalisée sur un système hybride photovoltaïque-éolien utilisés pour l'étude des performances de la machine asynchrone double alimentations dans le cas de fonctionnements en génératrice autonome, Le but de ces techniques est de maintenir une tension constante (amplitude et fréquence) pour des charges et des vitesses variables pour une utilisation en site isolé.

Dans la première partie de ce travail, nous avons présenté des généralités sur l'énergie éolienne et l'énergie solaire ainsi que les différentes composantes de production telle que l'aérogénérateur et le panneau photovoltaïque et aussi nous avons présenté les avantages et les inconvénients.

Les modèles mathématiques des systèmes étudiés ont été présentés. On a commencé avec les modèles des machines électriques, dans la deuxième partie, nous avons abordé la simulation des différents éléments des deux chaînes et aussi les convertisseurs statiques utilisés.

Dans la troisième partie, nous avons présenté les résultats de simulation d'un système hybride éolien - photovoltaïque .

Pour contribuer à la solution aux problèmes d'énergie, il est intéressant de développer des sources décentralisées de ces énergies .dans la recherche de telles solution, le système hybride développé pourra constituer un moyen très économique pour l'énergie d'électrification rurale.

Ce travail offre quelques perspectives que nous présentons ci-après :

- Envisager une réalisation pratique du système d'énergie hybride proposé
  - Ajout d'autres dispositifs de stockage (banc de batteries)
  - Couplages du système d'énergie hybride sur le réseau électrique de grande puissance, afin de servir plus d'utilisateurs.
  - .Amélioration du rendement du système d'énergie hybride en introduisons d'autres sources d'énergie renouvelables comme l'hydrogène qui peut être produit par électrolyse,
-

## CONCLUSION GENERALE

---

puis stocké et enfin réutilisé par une pile à combustible pour produire de l'énergie électrique vert.



**Annexe**

# Annexe

## 1-machine à induction double alimentée :

Paramétré	Valeur numérique
Puissance nominale	7.5KW
Résistance statorique	0.474( $\Omega$ )
Résistance rotorique	0.7614( $\Omega$ )
Inductance mutuelle	0.107(H)
Inductance statorique	0.12(H)
Inductance rotorique	0.122(H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	220V
Fréquence du réseau	50Hz

## Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramétré	Valeur numérique
Nombre depale	3
Diamètre d'une pale	3m
Gain du multiplicateur	2
Inertie de l'arbre	0.5Kg. $m^2$
Coefficient de frottement	0.0024N.m.s/rad

## Paramètres de la redresseur :

$r = 0.3\Omega$  ,  $l = 14e-3H$  ,  $c = 2e-3F$

**2- Caractéristique du module photovoltaïque :**

(température  $T=25^{\circ}$  , Eclairement  $E=1000\text{w}/.m^2$ )

Paramétré	Valeur numérique
Courant de court-circuit $I_{cc}$	2.41A
Tension de circuit ouvert $V_{C0}$	22.4V
Résistance série ( $\Omega$ )	25 $\Omega$
$\alpha$ :coefficient de variation de courant enfant température %	0.06%
$\beta$ :coefficient de variation de tension enfant température %	0.4%

$N_s = 10$

$N_p = 2$

**Paramétré de la hacheur :**

$L=0.4\text{H}$  ,  $R=200\Omega$  ,  $C=1e-4\text{F}$

# **Références Bibliographiques**

## *Références Bibliographiques*

- [1] Mahammedi Abdellatif'' Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque'' mémoire de magister, Université Setif1 Algérie 2014.
- [2] Hassini Née Belghitri Houda. Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen. Algérie 2010.
- [3] Fellah Boumediene. Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah . Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie 2012.
- [4]Zigha Ali. ''étude et simulation d'un système hybride photovoltaïque-éolien. Mémoire de Master. Université Constantine I . Algérie 2014.
- [5] Bounaceur Amin''Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie'' Mémoire de Master, Université de Ouargla , Algérie 2015.
- [6] Hananou Fatiha-Rouabah Aicha. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. Mémoire de Master Académique. Université Ouargla . Algérie 2014.
- [7] Mohammed Belhadj ''Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ''Mémoire de magistère, Université de Bechar, Algérie 2007.
- [8] L.Protin and S.ASTIER, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique d'ingénieur, D 3360, 1996.
- [9] Frédéric Poitiers ''Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne . Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France 2003.
- [10] Sadek Ameziane ''implantation expérimentale de L'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien ''. Mémoire de Magistère, Université de Batna, Algérie 2009.
- [11] Olivier Gergaud ''modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associe a un accumulateur. Thèse de Doctorat, Université de Cachan, France 2002.
-

- [12] BenAmor Afaf " Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau" Mémoire de Magistère Université d'El-Oued. Algérie 2013.
- [13] Haritza Camblong "minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable "thèse de Doctorat l'Université de Bordeaux, France 2003.
- [14] Miguel Lopez" Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée .Thèse de Doctorat, Université de Paris, France.
- [15] Maghzel Saliha. "Contribution à la modélisation et la commande d'une turbine éolienne". Mémoire de Magister. Université de Skikda. Algérie 2012.
- [16] Fridjat Abdessatar-Salhi belkacem" commande de la machine asynchrone à double alimentation dans un site isole avec entrainement par système a énergie éolienne." Mémoire de Master. Université d'El-Oued. Algérie 2017.
- [17] Latreche Soufiane-Bouزيد Khair-Eddine" Etude et réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduinouno. Mémoire de Master. Université Ouargla. Algérie 2016.
- [18] Touil Nacer Eddine-Ghenbazi Slimane "Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque" Mémoire de Master. Université d'El-Oued. Algérie 2015.
- [19] H. Knopf, 'Analysis, Simulation and Maximum of Evaluation Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle', Master of Science in Electrical and Computer Engineering, Portland State University, 1999.
- [20] J. Fadat, 'Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque Commande MPPT', La Revue 3EI, N°43, Décembre 2005.
- [21] Naouel Hamdi "Modélisation et commande des génératrices éoliennes "Mémoire de magistère de l'Université de Constantine, Algérie 2008.
- [22] Salama El Aimani,«Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension »,thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL).
-