

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية 1

Université SAAD DAHLAB de BLIDA1

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الآلية والكهروتقني

Département d'Automatique & Électrotechnique



## Mémoire De Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Présenté par :

**BENDAHIB Romaissa**

# Optimisation de la puissance d'un GPV à l'aide de la logique floue

Proposé par : Mme. BOUDISSA El-Ghalia & Mr. BOUNKHLA M'hamed

Année Universitaire 2022-2023

# Remerciements

---

*Nous tenons à remercier dieu qui nous donne le courage et le savoir pour achever ce modeste travail.*

*Toute notre reconnaissance et nos plus vifs remerciements s'adressent à notre encadreur et directeur de Mémoire Madam Boudissa El-ghalia, Docteur à l'Université de*

*Blida , pour ses précieux conseils, son aide, sa patience et sa gentillesse, c'était un grand honneur de travailler avec vous.*

*J'exprime ma reconnaissance à M<sup>s</sup> Bounkhla M'hamed, Professeur à l'Université de Blida pour la qualité de son encadrement exceptionnel, sa patience, ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter notre réflexion,*

*Nous souhaitons témoigner nos remerciements à notre jury, pour nous avoir accordé son temps précieux afin d'examiner ce travail.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont bien voulu, par un mot, une idée, un geste, ou une présence, contribuer à l'élaboration du présent mémoire de fin d'étude.*

*Merci à toutes et à tous !*

# Dédicace

---

*Pour les moments de la vie intensément vécus ceux de la  
Peur, de l'échec et la réussite.*

*Moi, Bendahib Romaiïssa*

*Dédions le fruit de ce travail à nous très chers parents les  
plus proches de nos cœurs, pour leurs sacrifices et leurs  
présences, nous vous aime ; qu'ALLAH vous protège.*

*À nos sœurs et frères ainsi que à toutes nos familles.*

*À tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin par leurs  
encouragements durant nos années d'étude.*

*À nos chères amies*

# Résumé

La puissance de sortie du générateur photovoltaïque (GPV) dépend de plusieurs facteurs climatiques, tels que l'ensoleillement et la température. Cependant, une poursuite en temps réel du point optimal de fonctionnement (MPP : Maximum Power Point) est nécessaire pour optimiser le rendement du système. L'objectif du travail est l'étude et la simulation sous l'environnement MATLAB -SIMULINK d'une commande basée sur la logique floue pour le suivi du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque sous des conditions d'éclairement et de température fixes. Ainsi, les résultats de simulation sont donnés pour le hacheur Boost et le PV-hacheur Boost en fixant le rapport cyclique de la commande. En final, les résultats sont présentés pour la commande MPPT à base de logique floue pour des configurations de quatre, cinq et sept fonctions d'appartenance.



قدرة مولد الطاقة الشمسية (GPV) تعتمد على عدة عوامل مناخية مثل سطوع الشمس ودرجة الحرارة. ومع ذلك، يتطلب تتبع نقطة التشغيل الأمثل في الوقت الحقيقي (MPP: نقطة الطاقة القصوى) لتحسين كفاءة النظام. يهدف هذا العمل إلى دراسة ومحاكاة واستخدام منطق غامض للتحكم في تتبع نقطة القدرة القصوى لنظام الطاقة الشمسية في ظروف إشعاع ودرجة حرارة ثابتة، باستخدام بيئة MATLAB-SIMULINK. يتم تقديم نتائج المحاكاة لمحول Boost ومحول PV-Boost عند تثبيت نسبة التشغيل للتحكم. في النهاية، يتم تقديم نتائج التحكم في نقطة القدرة القصوى بناءً على المنطق الغامض لتكوينات تتضمن أربع وخمس وسبع وظائف انتماء.

## Abstract

The output power of the photovoltaic generator (GPV) depends on several climatic factors, such as sunlight and temperature. However, real-time tracking of the maximum power point (MPP) is necessary to optimize the system's efficiency. The objective of this work is to study and simulate, using the MATLAB-SIMULINK environment, a fuzzy logic-based control for tracking the maximum power point of a photovoltaic system under fixed irradiance and temperature conditions. The simulation results are then presented for the Boost converter and PV-Boost converter with a fixed duty cycle. Finally, the results are presented for the fuzzy logic-based MPPT control with configurations of four, five, and seven membership functions.

# Table des Matières

---

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I Généralités sur l'énergie photovoltaïque</b> .....	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Les énergies renouvelables .....	3
I.2.1 Energie hydraulique.....	4
I.2.2 Energie Géothermique .....	4
I.2.3 Energie Biomasse .....	5
I.2.4 Energie Eolienne .....	6
I.2.5 Energie Solaire.....	7
I.3 L'énergie solaire photovoltaïque.....	8
I.3.1 Définition d'énergie solaire photovoltaïque .....	8
I.3.2 Le rayonnement solaire .....	8
I.3.3 Le Potentiel Solaire en Algérie.....	10
I.3.4 Effet photovoltaïque .....	10
I.3.5 Description d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.3.6 Modèle de cellule .....	11
I.3.7 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque .....	13
I.3.8 Technologies des cellules solaires en Silicium.....	14
I.3.9 Influence de la température et de l'éclairement sur caractéristique d'un module PV ..	15
I.3.9.1 Influence de l'ensoleillement.....	15
I.3.9.2 Influence de la température.....	16
I.3.10 Générateur photovoltaïque .....	17
I.3.10.1 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque .....	19
I.3.11 Système d'énergie photovoltaïque.....	19
I.3.12 Avantage et inconvénient d'une installation PV .....	21
I.4 Conclusion.....	22

<b>Chapitre II Etage d'adaptation et commande MPPT .....</b>	<b>23</b>
II.1 Introduction.....	23
II.2 Connexion d'un GPV.....	23
II.2.1 Connexion directe .....	24
II.2.2 Connexion indirecte GPV-Hacheur-charge .....	25
II.3 Convertisseurs DC-DC .....	27
II.3.1 Hacheur BUCK .....	27
II.3.2 Hacheur BUCK-BOOST.....	28
II.3.3 Hacheur BOOST .....	28
II.3.3.1 Fonctionnement .....	29
II.4 Modèle mathématique équivalent.....	30
II.5 Simulation du hacheur BOOST .....	31
II.5.1 Simulation du hacheur BOOST sans PV .....	31
II.5.2 Simulation du hacheur BOOST avec PV .....	32
II.6 Poursuite Du Point De Puissance Maximale D'un Système Photovoltaïque .....	34
II.6.1 Techniques de recherche du point de puissance maximal MPPT .....	35
Plusieurs techniques de recherche du point de puissance maximal MPPT existent dans la littérature. On peut distinguer principalement deux catégories : .....	35
II.6.1.1 Techniques conventionnelles.....	35
II.6.1.2 Techniques avancées .....	38
II.7 Conclusion .....	39
<b>Chapitre III Logique floue.....</b>	<b>41</b>
III.1 Introduction .....	41
III.2 Présentation de la logique floue .....	41
III.2.1 Historique.....	41
III.2.2 Principe de la logique floue .....	41
III.3 Utilisations de la logique floue pour le contrôle.....	42
III.3.1 Contrôleur flou.....	42
III.4 Résultats de la simulation.....	43
III.5 Interprétation des résultats.....	51

III.6 Conclusion.....	52
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>54</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>56</b>

# Liste des figures

---

## Chapitre I : Généralistes sur l'énergie photovoltaïque

<b>Figure I. 1:</b> Les types d'énergies renouvelables.....	3
<b>Figure I. 2:</b> Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.....	4
<b>Figure I. 3:</b> Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique.....	5
<b>Figure I. 4:</b> Principe de fonctionnement de l'énergie biomasse.....	6
<b>Figure I. 5:</b> Composition d'une éolienne.....	7
<b>Figure I. 6:</b> Energie solaire.....	8
<b>Figure I. 7:</b> Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	9
<b>Figure I. 8:</b> Différents composants de rayonnement.....	9
<b>Figure I. 9:</b> Principe de l'effet photovoltaïque.....	10
<b>Figure I. 10:</b> Structure d'une cellule PV.....	11
<b>Figure I. 11:</b> Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	11
<b>Figure I. 12:</b> Caractéristique courant-tension d'une photopile.....	13
<b>Figure I. 13:</b> Caractéristique puissance-tension d'une photopile.....	13
<b>Figure I. 14:</b> Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de l'éclairement.....	16
<b>Figure I. 15:</b> Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de la température.....	17
<b>Figure I. 16:</b> Passage d'une cellule à un champ photovoltaïque.....	17
<b>Figure I. 17:</b> Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules PV.....	18
<b>Figure I. 18:</b> Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules PV.....	18
<b>Figure I. 19:</b> Association de deux générateurs PV en parallèles avec les diodes de protections.....	19
<b>Figure I. 20:</b> Schéma synoptique d'un système autonome.....	20
<b>Figure I. 21:</b> Schéma synoptique d'un système hybride.....	21
<b>Figure I. 22:</b> Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau.....	21

## Chapitre II : Etage d'adaptation et commande MPPT

<b>Figure II. 1:</b> Connexion directe entre un GPV et une charge.....	24
<b>Figure II. 2:</b> GPV-Etage d'adaptation-charge.....	26

<b>Figure II. 3:</b> Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	27
<b>Figure II. 4:</b> Schéma électrique d'un hacheur BUCK. ....	28
<b>Figure II. 5:</b> Schéma électrique d'un hacheur BUCK-BOOST. ....	28
<b>Figure II. 6:</b> Schéma électrique d'un hacheur BOOST. ....	29
<b>Figure II. 7:</b> Chronogrammes du courant et de la tension d'un hacheur BOOST. ....	29
<b>Figure II. 8:</b> Schéma électrique d'un hacheur BOOST fermé. ....	30
<b>Figure II. 9:</b> Schéma électrique d'un hacheur BOOST ouvert. ....	30
<b>Figure II. 10 :</b> Schéma bloc de simulation d'un modèle hacheur Boost. ....	31
<b>Figure II. 11:</b> Tension d'entrée $V_i$ et de sortie $V_0$ d'un hacheur DC-DC BOOST. ....	32
<b>Figure II. 12:</b> Schéma bloc de simulation d'un modèle PV -Hacheur Boost.....	33
<b>Figure II. 13:</b> Allure de la tension d'entrée $V_i$ du PV - hacheur BOOST.....	33
<b>Figure II. 14:</b> Allure de tension sortie du PV $V_0$ - hacheur BOOST.....	34
<b>Figure II. 15:</b> Application de l'algorithme P&O sur la caractéristique PPV(VPV).....	35
<b>Figure II. 16:</b> Organigramme de l'algorithme 'P&O'.....	36
<b>Figure II. 17:</b> Méthode IncCond pour poursuivre le MPP.....	37
<b>Figure II. 18:</b> Organigramme de l'algorithme 'INC'.....	37
<b>Figure II. 19:</b> Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique.....	38

### **Chapitre III:Logique floue**

<b>Figure III. 1:</b> Schéma block de l'algorithme à base de logique floue.....	43
<b>Figure III. 2:</b> Schéma bloc de la commande logique floue sur SPV.....	44
<b>Figure III. 3:</b> Les fonctions d'appartenance (a) $\Delta p$ (b) $\Delta I$ et (c) La sortie $\Delta D$ .....	45
<b>Figure III. 4:</b> Puissance aux bornes du GPV avec commande à base de LF avec 4 fonctions d'appartenance en entrée.....	46
<b>Figure III. 5:</b> Les fonctions d'appartenance (a) E (b) CE et (c) La sortie D. ....	47
<b>Figure III. 6:</b> Puissance aux bornes du GPV avec commande à base de LF avec 5 fonctions d'appartenance en entrée.....	48
<b>Figure III. 7:</b> Les fonctions d'appartenance (a) E (b) CE et (c) La sortie D. ....	49
<b>Figure III. 8:</b> Puissance aux bornes du GPV avec commande à base de LF avec 7 fonctions d'appartenance en entrée.....	50
<b>Figure III. 9:</b> Comparaison des différents Allures de puissance de d'entre et la puissance idéale de GPV dans les 3 cas. ....	51

# Liste des Tableaux

---

<b>Tableau I. 1:</b> Différents types existants actuellement sur le marché.....	14
<b>Tableau II. 1:</b> Valeurs du vecteur Paramètres Boost.	31
<b>Tableau II. 2:</b> Paramètres de simulation.	32
<b>Tableau III. 1:</b> Les caractéristiques du pv soltech 1soltech-215-p.	43
<b>Tableau III. 2:</b> Les paramètre du hacheur bosst.	44
<b>Tableau III. 3:</b> Table à quatre fonctions d'appartenance.	46
<b>Tableau III. 4:</b> Table à cinq fonctions d'appartenance.	48
<b>Tableau III. 5:</b> Table à sept fonctions d'appartenance.	50
<b>Tableau III. 6:</b> Comparaison entre les différents rendements des fonctions d'appartenance.	51
<b>Tableau III. 7:</b> Les rendements des différentes fonctions d'appartenance.	52

# Liste des Abréviations

Abréviations	Le sens
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque
I-V	courant tension
P-V	puissance tension
V <sub>co</sub>	Tension circuit ouvert
I <sub>cc</sub>	Courant de court circuit
N <sub>s</sub>	Nombre de cellules en série
N <sub>p</sub>	Nombre de cellules en parallèle
P	Charge positive
N	Charge négative
q	Charge de l'électron
I <sub>D</sub>	Courant de la diode
R <sub>s</sub>	Resistance série
R <sub>sh</sub>	Resistance shunt
DC	Courant continue
AC	Courant alternatif
DC-DC	Conversion continue-continue (hacheur)
PPM	Point de puissance maximale
MPPT	Maximum power point tracking
P&O	Algorithme « perturbation et observation »
LF	Logique floue

# Introduction générale

---

La demande énergétique mondiale ne cesse d'augmenter en raison de la croissance démographique et du développement économique dans tous les pays. En fait, cela réduit les réserves de combustibles fossiles, ce qui affecte également l'environnement, qui contribue de manière significative à l'augmentation de la température moyenne de la terre, c'est-à-dire au réchauffement climatique de la terre. Toutefois, les scientifiques du monde entier cherchent à résoudre ces deux énormes enjeux (Energie et Environnement).[1]

La première solution repose sur l'exploitation de l'énergie nucléaire, puisqu'elle offre une très grande énergie développée par la fission de l'atome de l'uranium. Cependant, elle pose de réels problèmes environnementaux liés au traitement des déchets radioactifs et au démantèlement des centrales nucléaires obsolètes.

La deuxième option est basée sur l'utilisation des énergies renouvelables (l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, du bois...etc.). Dans cette optique, plusieurs pays ont engagé des investissements immenses et semblent de ce fait sur la bonne voie pour réussir le challenge d'allier la production et la consommation d'énergie d'un côté et le maintien de l'équilibre environnemental de la planète de l'autre. Le soleil reste dans ce cas, que ce soit de manière directe ou indirecte, la source d'énergie la plus prometteuse. Les progrès technologiques permettent en effet d'envisager dès aujourd'hui une part non négligeable du mix énergétique de demain à partir des deux composantes énergétiques essentielles du rayonnement solaire thermique et lumineuse.

L'Algérie comme la plus part des pays du monde a adopté un programme ambitieux de production et de promouvoir les énergies renouvelables, il sert à produire d'ici 2030 : 22000 MW à base principalement de solaire photovoltaïque et l'éolienne.[2]

L'énergie solaire photovoltaïque connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable, c'est d'ailleurs l'une des énergies renouvelables la plus utilisée. Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible. Ceci présuppose l'utilisation et la mise en œuvre

de techniques permettant d'optimiser le profit de cette technologie en tirant le maximum de la puissance pouvant être produite.

L'utilisation de la logique floue dans les systèmes PV permet d'optimiser les performances, d'augmenter l'efficacité énergétique et de réduire les coûts opérationnels. Elle offre une approche flexible et adaptative pour traiter les informations incertaines et améliorer la gestion globale des systèmes photovoltaïques.

L'objectif principal de notre mémoire vise à étudier en détails le système PV, afin de remplir les objectifs de maximisation de la production, la qualité de l'énergie fournie par le système photovoltaïque.

Pour ce faire, le mémoire est organisé en trois chapitres et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur l'énergie solaire.

Le deuxième chapitre focalise sur l'étage d'adaptation et les commandes MPPT conventionnelles et avancées. Nous validerons cette partie en simulant sous l'environnement Matlab/Simulink le hacheur Boost et le panneau photovoltaïque-hacheur Boost en fixant le rapport cyclique de la commande

Le troisième chapitre est dédié à l'étude de la logique floue ainsi que son application pour l'optimisation d'un système photovoltaïque. Nous présentons les résultats de simulation de la commande MPPT à base de logique floue pour des configurations des entrées à quatre, cinq et sept fonctions d'appartenance.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale relative aux résultats de simulation obtenus.

# Chapitre I Généralistes sur l'énergie photovoltaïque

---

## I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque est la transformation directe de l'énergie de la lumière du soleil en énergie électrique au moyen des cellules solaires fabriquées à base du matériau semi-conducteur généralement au silicium. L'association en série et en parallèle de ces cellules donne lieu à un module photovoltaïque. Pour obtenir une puissance d'utilisation désirée, ces modules peuvent être également assemblés en série et en parallèle pour former un générateur PV. La puissance produite par le générateur PV dépend du niveau d'éclairement et de la température de jonction de la cellule photovoltaïque. [1]

Dans ce premier chapitre, nous décrivons quelques généralités et définitions sur les énergies renouvelables, plus précisément sur l'énergie solaire photovoltaïque qui est le fondement de notre mémoire.

## I.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ont plusieurs ressources. On se limite de manière générale à cinq ressources fondamentales [2] comme l'illustre la Figure I.1

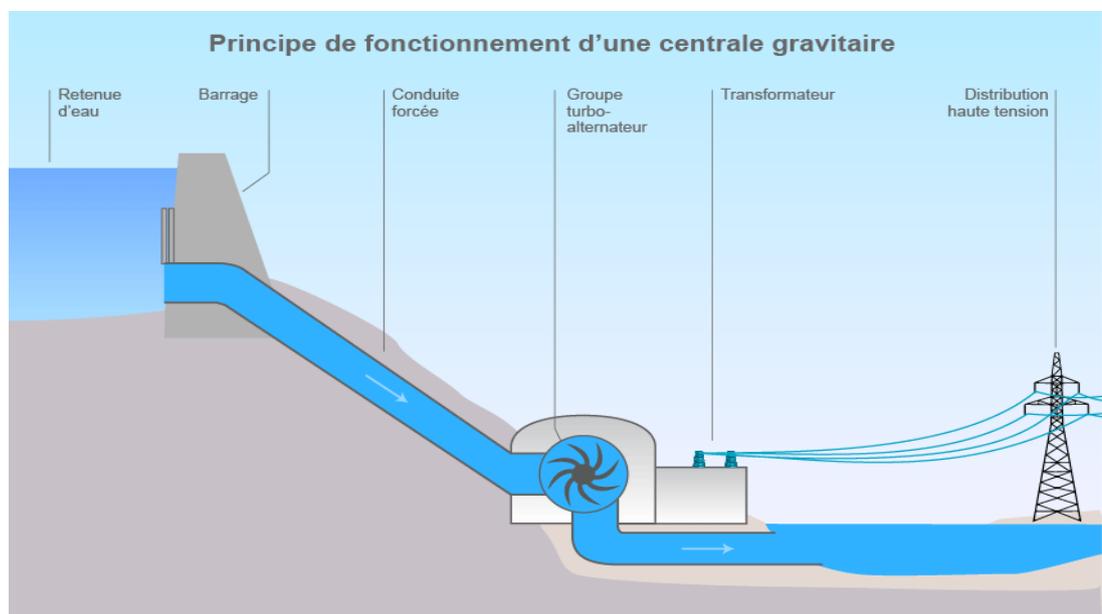


**Figure I. 1:** Les types d'énergies renouvelables.

## I.2.1 Energie hydraulique

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique ou bien l'hydroélectricité est la production d'électricité à partir de la force de l'eau. Elle est apparue au milieu du XIXe siècle dans la continuité des moulins qui exploitaient directement la force motrice de l'eau, c'est une solution extrêmement attractive puisqu'elle est exploitée au voisinage du maximum de son potentiel dans de nombreux pays industrialisés.

L'énergie hydroélectrique a été synonyme d'un développement économique très important. En effet, l'augmentation de la capacité hydroélectrique (excluant les installations de pompage-turbinage) a été d'environ 28 GW en 2015, ce qui porte la capacité totale mondiale à quelque 1 064 GW [3].



**Figure I. 2:** Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.

## I.2.2 Energie Géothermique

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie se distinguent selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie
- La géothermie de basse énergie.
- La géothermie de très basse énergie

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée

soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...) [4].

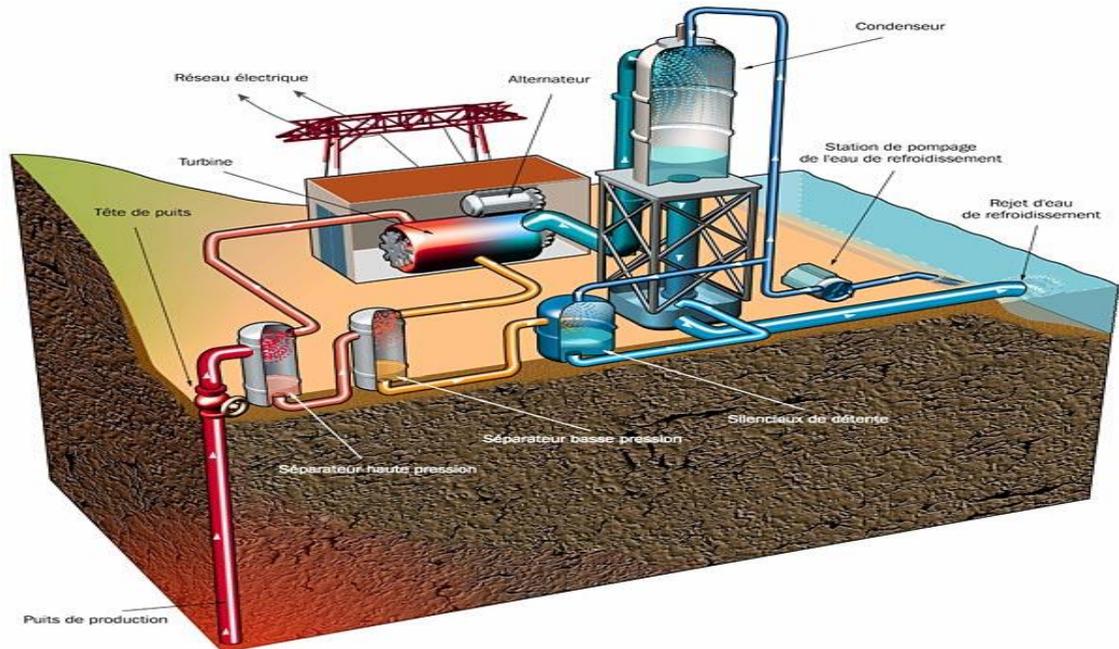
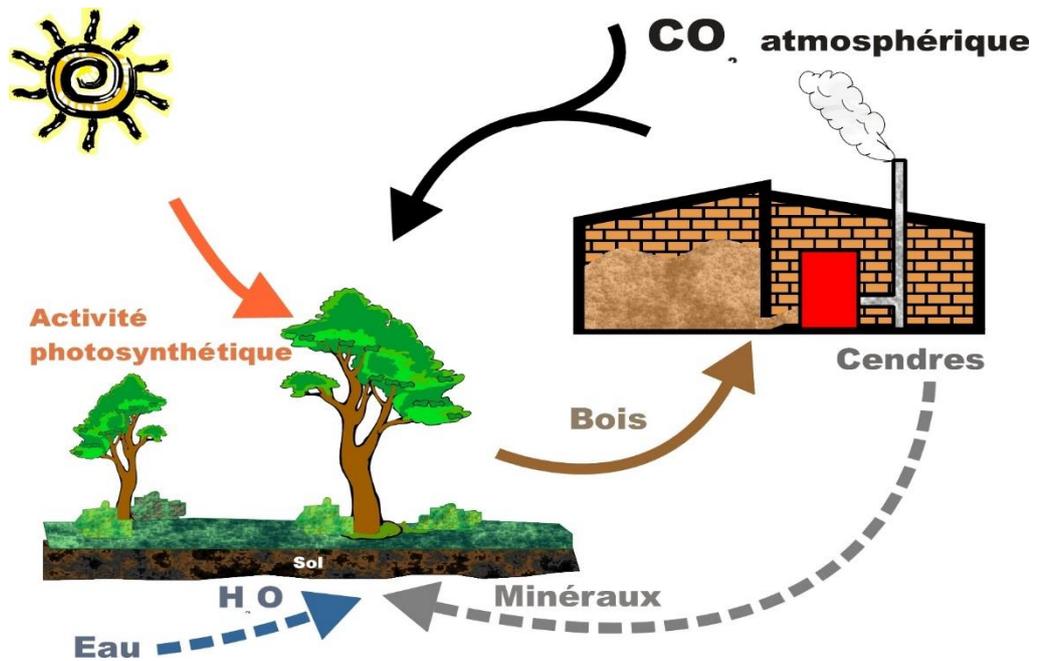


Figure I. 3: Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique.

### I.2.3 Energie Biomasse

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses.

- **La biomasse par combustion :** Les déchets sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles (paille, canne à sucre, arachide, noix de coco...).
- **La biomasse par méthanisation :** Les déchets sont d'abord transformés en un biogaz, par fermentation grâce à des micro-organismes (bactéries). Le biogaz est ensuite brûlé. Ce biogaz est proche du gaz naturel et majoritairement composé de méthane. Cela concerne les déchets ménagers, le fumier et lisier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers et cartons... [5]



**Figure I. 4:** Principe de fonctionnement de l'énergie biomasse.

## I.2.4 Energie Eolienne

L'énergie éolienne est considérée comme l'une des technologies les plus prometteuses pour la production d'électricité, en termes d'écologies, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses, le montant total mondial de production est de l'ordre de 433 GW enregistré fin 2015. L'éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

La puissance d'une éolienne dépend de la vitesse du vent, lorsque la vitesse du vent augmente la puissance de sortie augmente.

L'emplacement de l'installation de l'éolienne est souvent choisi dans les zones où les vents sont forts et constants, telles que l'exploitation des sites de haute altitude et dans la mer (offshore).

La Chine occupant la première place de production, aussi des nouveaux marchés ont émergé en Afrique, en Asie et en Amérique latine. Les entreprises et les acteurs privés ont continué d'opter pour l'énergie éolienne lorsqu'ils souhaitent assurer une électricité fiable et économique, et plusieurs grands investisseurs ont été séduits par son rendement constant [6].

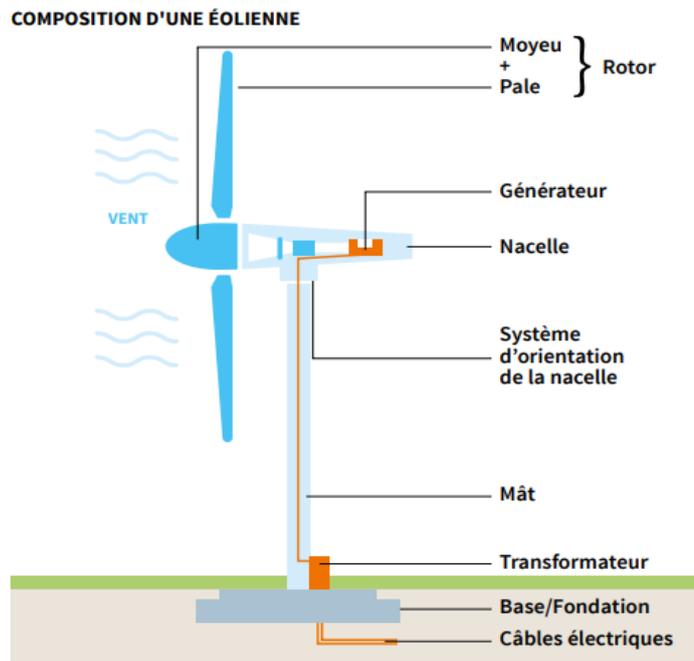


Figure I. 5: Composition d'une éolienne.

### 1.2.5Energie Solaire

Le soleil est une source quasi-inépuisable d'énergie qui envoie vers la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWh/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [8]. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- **Energie solaire thermique** : consiste tout simplement à produire directement de la chaleur grâce à des capteurs adéquats. Cette dernière pouvant à son tour servir la production d'électricité.
- **Energie solaire passive** : il s'agit d'une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire en convertissant directement le rayonnement solaire en chaleur.
- **Energie solaire photovoltaïque** : consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires dits photovoltaïques.

D'après les calculs qui ont été faits par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), une surface de 145000km<sup>2</sup> (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux, ce qui rend le solaire photovoltaïque une solution efficace et prometteuse.



**Figure I. 6:** Energie solaire.

### **I.3 L'énergie solaire photovoltaïque**

L'énergie photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la lumière du soleil pour produire de l'électricité. Elle est obtenue grâce à l'utilisation de dispositifs appelés cellules solaires ou panneaux solaires, qui convertissent directement la lumière du soleil en électricité.

#### **I.3.1 Définition d'énergie solaire photovoltaïque**

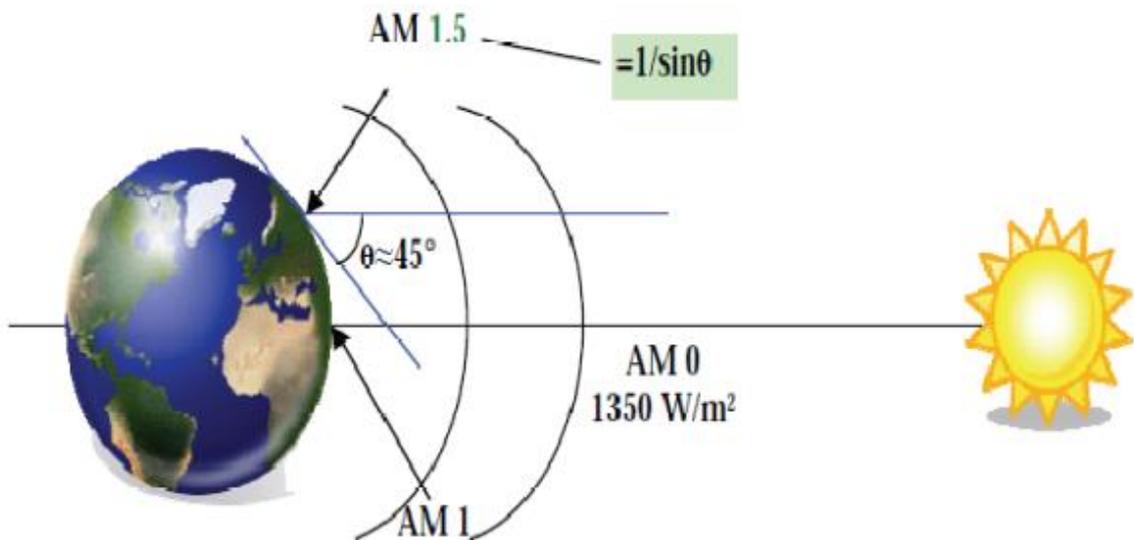
L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite à partir de la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium. Lorsque la lumière solaire frappe la surface de ces cellules, elle libère des électrons qui sont ensuite capturés et mis en mouvement, créant ainsi un courant électrique. [7]

#### **I.3.2 Le rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ( $0.2 \mu\text{m}$ ) à l'infrarouge lointain ( $2.5 \mu\text{m}$ ). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise.

Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à  $90^\circ$  d'inclinaison) atteint  $1000 \text{ W/m}^2$  du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration  $\theta$  est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande,

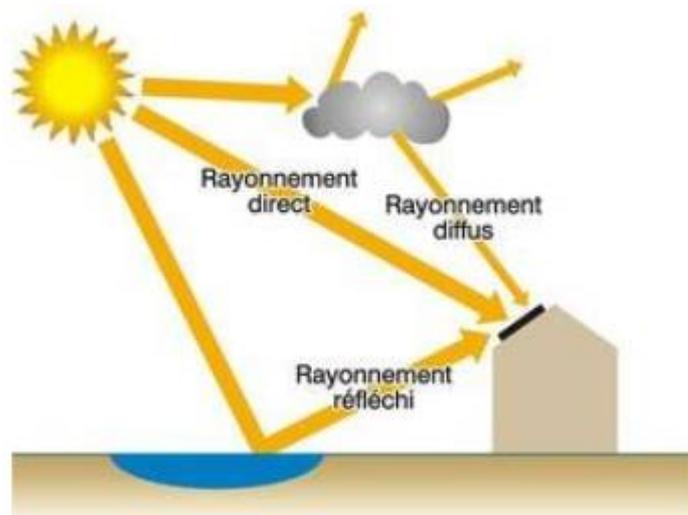
d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de  $48^\circ$  avoisine les  $833 \text{ W/m}^2$  (AM1.5).



**Figure I. 7:** Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [8].

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelle conque est constitué de trois composantes principales :

- **Rayonnement direct**
- **Rayonnement diffus**
- **Rayonnement réfléchi**
- **Rayonnement global**



**Figure I. 8:** Différents composants de rayonnement.

### I.3.3 Le Potentiel Solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de  $5\text{KWh}$  sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$  au nord et  $2263\text{kwh}/\text{m}^2/\text{an}$  au sud du pays.

Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durables s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

### I.3.4 Effet photovoltaïque

Lorsque le matériau de cellule est exposé au rayonnement du soleil, ses atomes sont "bombardés" par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons de valence (électrons des couches électroniques externes) ont tendance à être "arrachés / décrochés" dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "décollés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est directement transformée en énergie électrique, ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque ou photoélectrique (voir figure I.1).

Le terme photovoltaïque vient du mot grec photos qui désigne la lumière et de voltaïque mot dérivé du physicien italien-Alessandro-VOLTA.[9]

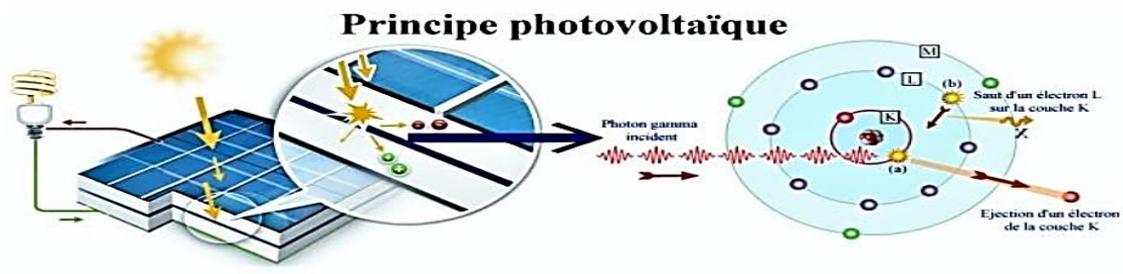


Figure I. 9: Principe de l'effet photovoltaïque.

### I.3.5 Description d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, appelée aussi photopile puisqu'elle génère un courant électrique continu à ses bornes, sous une tension électrique qui varie entre  $[0.4 - 0.6]$  volt

et une puissance de 2 à 5Watt avec deux surfaces standard 156\*156 mm<sup>2</sup> et 125\*125 mm<sup>2</sup>, cette dernière présente l'élément de base d'un système photovoltaïque.

Jusqu' à présent, le silicium est le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques, Il est classé parmi les éléments les plus abondants sur notre planète, il représente 28 % de la croûte terrestre. Il est non toxique, n'est pas présent à l'état pur mais sous forme de sable siliceux. Notamment pour le terrestre reste le silicium (Si) (98% des modules photovoltaïques fabriqués à base des cellules Si), sous formes cristallin, multi cristallin, amorphe et en couche mince. [10]

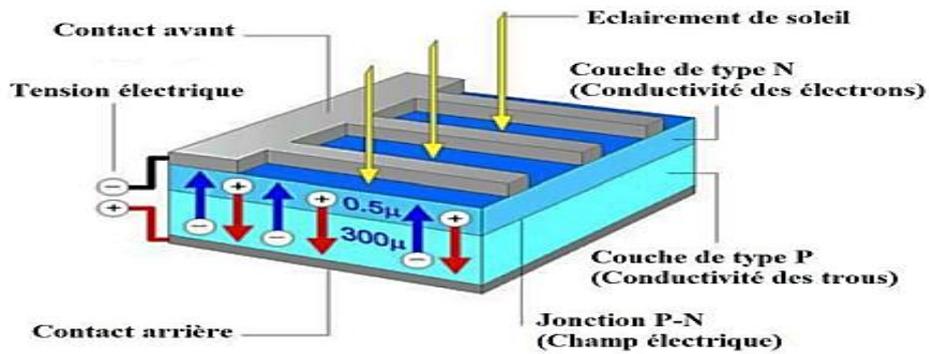


Figure I. 10: Structure d'une cellule PV

### I.3.6 Modèle de cellule

Le modèle mathématique associé à une cellule se trouve à partir de celui d'une jonction PN. On y ajoute le courant  $I_{ph}$ , proportionnel à l'éclairement, ainsi qu'un terme modélisant les phénomènes internes.

On peut déduire le modèle de cellule par un schéma équivalent, comme le montre la figure I :

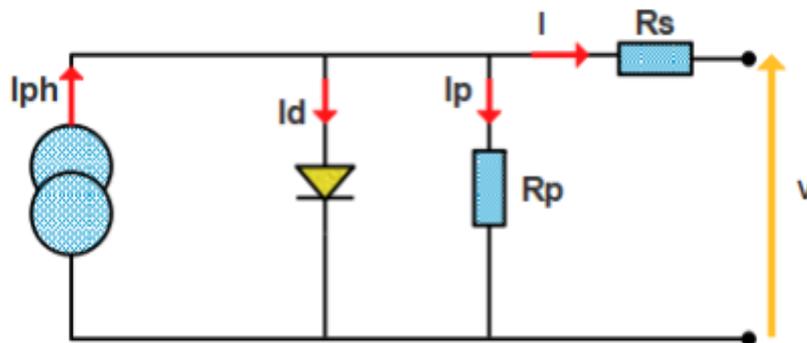


Figure I. 11: Schéma équivalent d'une cellule solaire.

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. [11]

En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base desilicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad \mathbf{I.1}$$

Avec I: le courant fourni par la cellule

$$I_{sc} = I_{scr} \left( \frac{G}{1000} \right) \quad \mathbf{I.2}$$

$I_{scr}$ : Courant de courant circuit de référence

$$I_p = \frac{v + I.R_s}{R_p} \quad \mathbf{I.3}$$

$I_p$  : courant dérive par la résistance parallèle

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + I.R_s}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad \mathbf{I.4}$$

$I_d$  : courant traversant la diode

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left[ \exp \left( \frac{V_{OC}}{nV_T} \right) - 1 \right]} \quad \mathbf{I.5}$$

$I_0$  : courant de saturation inverse d une diode

$$V_T = \frac{KT}{e} \quad \mathbf{I.6}$$

$V_T$  : Tension thermique

où

$e$  : Charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19} C$ )

$K$ : Constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J /K$ )

$\eta$ : Facture de non idealite de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique

$T$ : La tempertature effective de la cellule de kelvin

En utilisant les équations ci-dessus (**I.7**), on peut en déduire l'expression du courant délivre par la cellule photovoltaïque.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + I.R_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad \mathbf{I.7}$$

### I.3.7 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Plusieurs facteurs permettent d'évaluer les propriétés d'une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V).

La figure (I.12) représente une caractéristique courant-tension I(V) dans le noir et sous-éclairage typique d'une cellule photovoltaïque à jonction P-N. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont : le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) la tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le facteur de forme (FF) du composant.

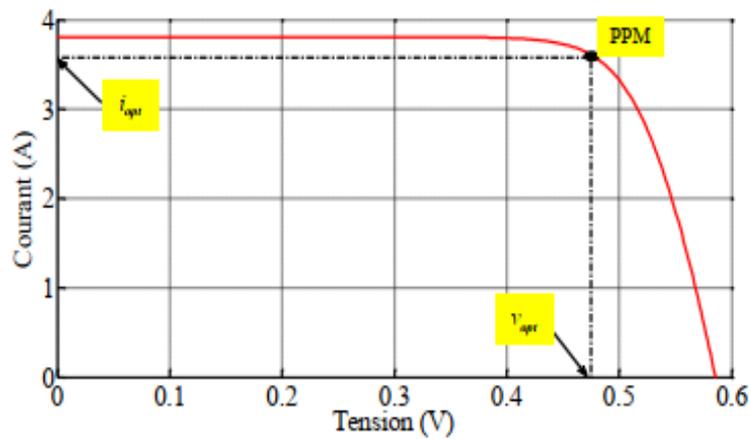


Figure I. 12: Caractéristique courant-tension d'une photopile.

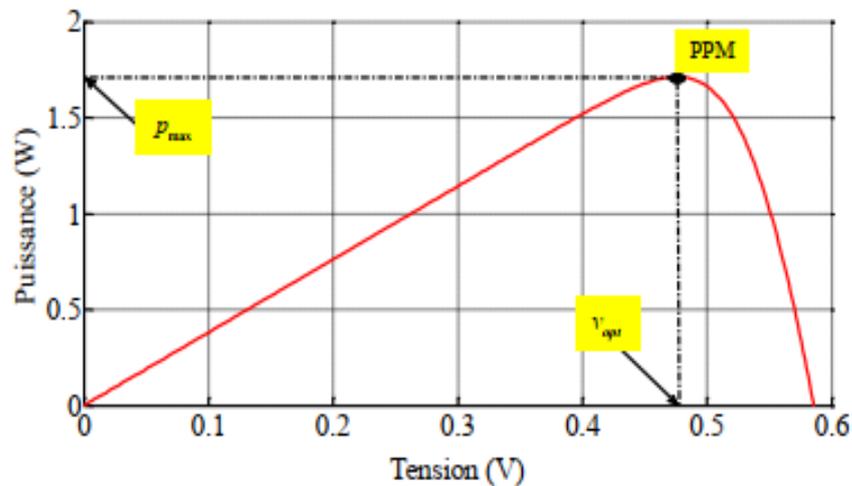
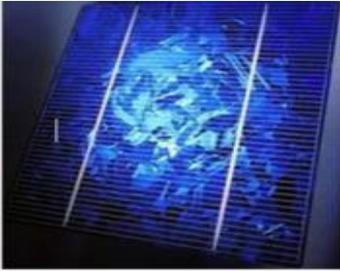


Figure I. 13: Caractéristique puissance-tension d'une photopile.

### I.3.8 Technologies des cellules solaires en Silicium

Les cellules solaires en silicium sont basées sur trois technologies principales : les cellules monocristallines, les cellules multi cristallines et les cellules amorphes. Une quatrième technologie, la cellule hétérojonction, consiste à combiner ces deux matériaux en déposant une fine couche de silicium amorphe hydrogéné sur un substrat cristallin (mono ou poly). Chacune de ces technologies possède ses propres avantages et inconvénients en termes de rendement et de coût.

Type	Silicium Monocristalline	Silicium Poly Cristalline	Silicium Amorphe
<b>Topologie</b>			
<b>Durée de vie</b>	35 ans	35 ans	10 ans
<b>Rendement</b>	12 à 16% jusqu'à 23% en laboratoire	11 à 15% jusqu'à 20% en laboratoire	8 à 10% jusqu'à 13% en laboratoire
<b>Avantages</b>	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que monocristallin mais plus que l'amorphe)	Bon rendement en diffusion
<b>Inconvénients</b>	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ...etc.) et prix élevée	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ...etc.) et prix élevée	Mauvais rendement en plein soleil
<b>Principales utilisations</b>	Aérospatial, module toits, façades	Dans les zones chaudes toits, façades et générateurs	Appareils électroniques et intégration dans les bâtiments

**Tableau I. 1:** Différents types existants actuellement sur le marché.

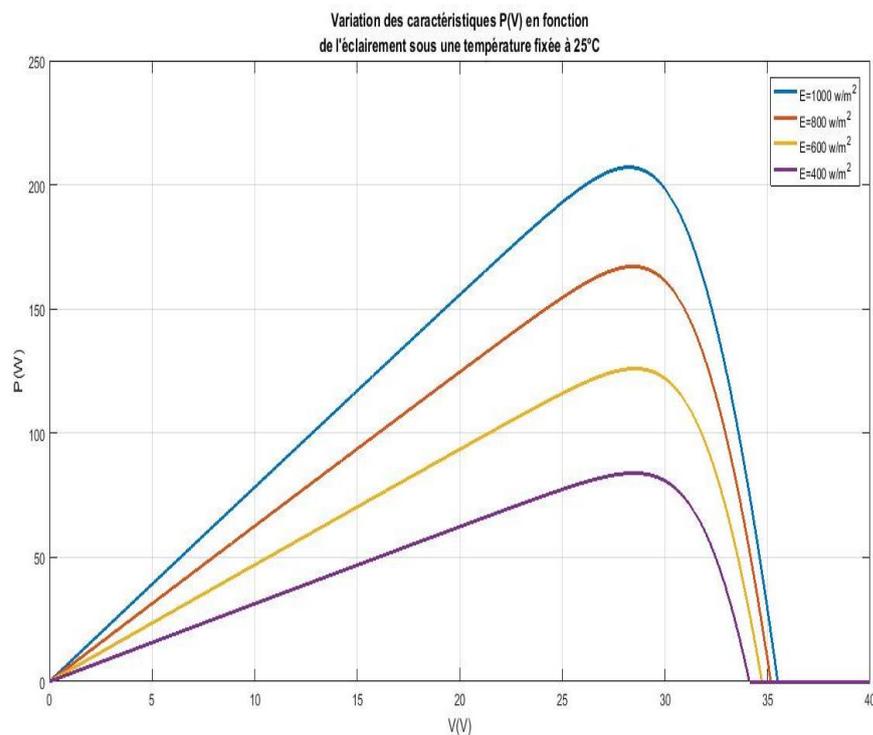
### I.3.9 Influence de la température et de l'éclairement sur caractéristique d'un module PV

On peut remarquer que la caractéristique  $I(V)$  d'un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'insolation et de la température.

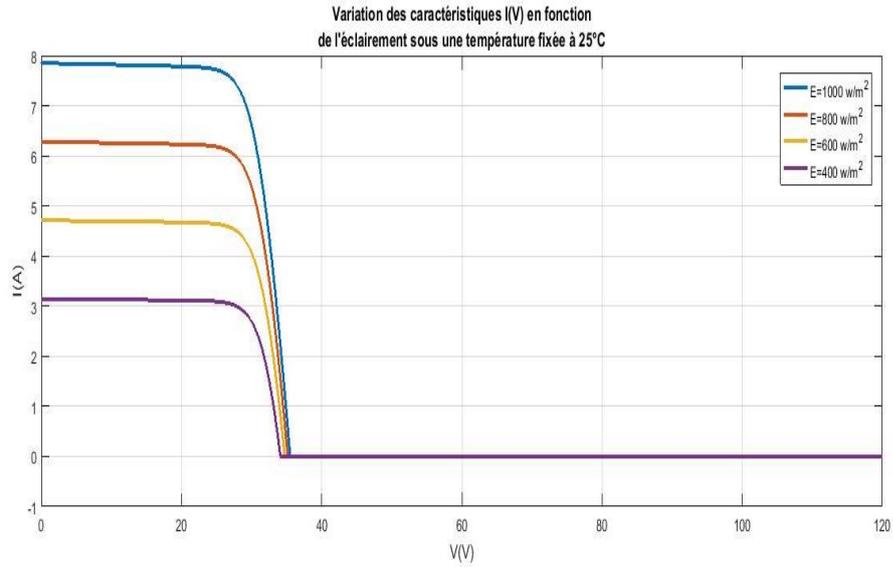
#### I.3.9.1 Influence de l'ensoleillement

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur la cellule PV. En effet, le photocourant est proportionnel à l'éclairement, par contre le courant à travers la diode qui n'est que le photo-courant à l'obscurité, reste inchangé aux variations de ce dernier. La figure 1.14 (a, b) présente respectivement les caractéristiques (I-V) et (P-V) de cellule pv simulée sous une température de référence de 25 °C et sous divers niveaux d'éclairements. On remarque que la tension du circuit ouvert. [12]

On remarque que la tension du circuit ouvert  $v_{oc}$  reste très peu changée en faisant varier l'éclairement  $G$ , par contre le courant du court-circuit  $i_{sc}$  varie beaucoup en augmentant l'éclairement ce qui engendre une augmentation de la puissance photovoltaïque.



Caractéristiques puissance -tension



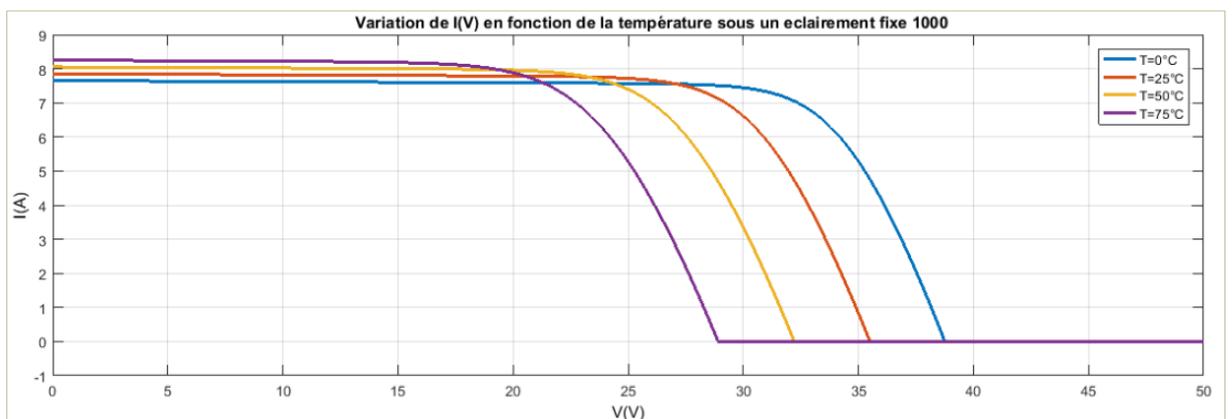
Courant tension

**Figure I. 14:** Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de l'éclairement.

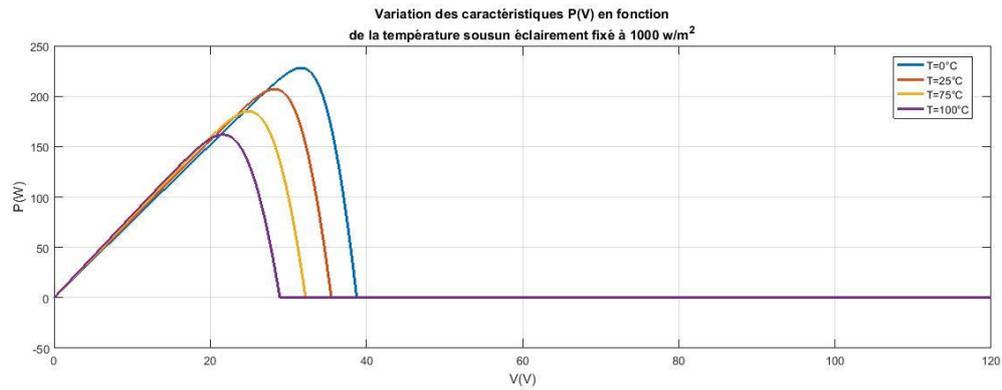
### I.3.9.2 Influence de la température

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de cellule pv.

La Figure 1.15 (a, b) illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous un éclairement de 1000 W m<sup>2</sup> et différentes températures. On remarque que le courant du court-circuit  $i_{sc}$  reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert  $v_{oc}$  diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la cellule PV.



Caractéristiques courant-tension

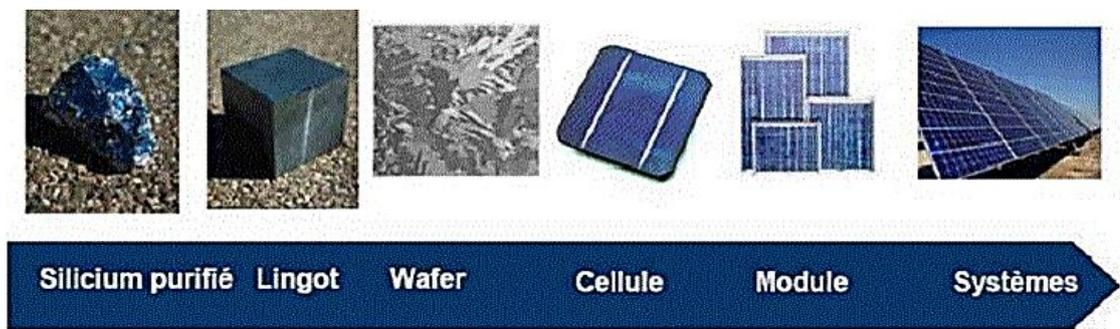


Caractéristiques puissance-tension

**Figure I. 15:** Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de la température.

### I.3.10 Générateur photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en électricité est réalisée grâce à un dispositif nommé générateur photovoltaïque. Pour obtenir la puissance crête souhaitée, ce générateur est constitué d'un nombre déterminé de modules solaires interconnectés en série ou en parallèle. Des composants supplémentaires sont nécessaires pour adapter l'électricité produite aux besoins des récepteurs. L'ajout de diodes de protection permet de passer d'un module à un panneau, incluant une diode en série pour empêcher les courants inverses et une diode by-pass en parallèle qui intervient en cas de déséquilibre pour minimiser la perte de production associée en limitant la tension inverse aux bornes de l'ensemble de cellules.

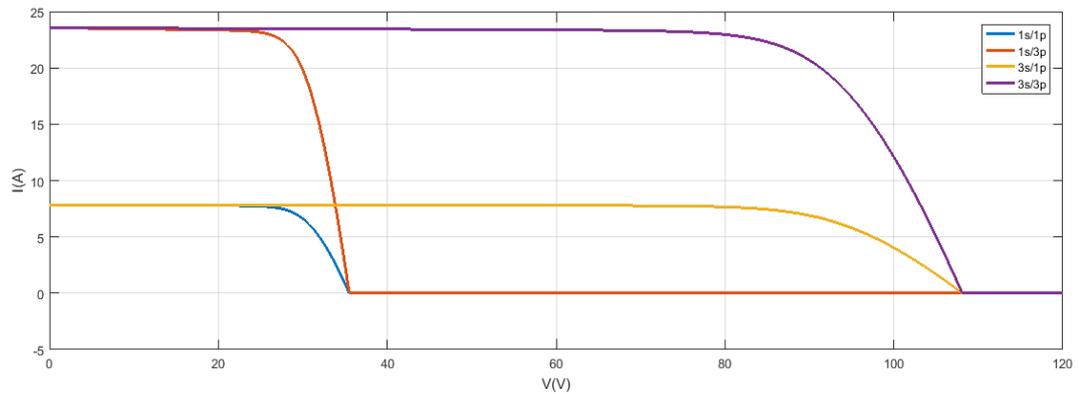


**Figure I. 16:** Passage d'une cellule à un champ photovoltaïque.

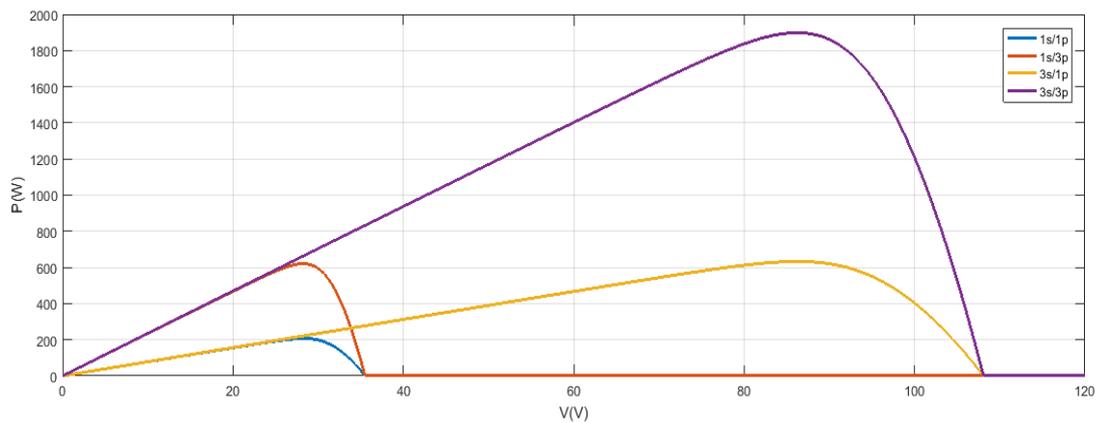
Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les ( $N_s$ ,  $N_p$ ) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la

même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison) [13].

Dans un groupement de modules connectés en parallèle, les modules étant soumis à la même tension, les intensités s'additionnent. La caractéristique résultante est obtenue par addition des courants à tension donnée. Dans un groupement en série, les modules sont traversés par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V.



**Figure I. 17:** Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules PV.

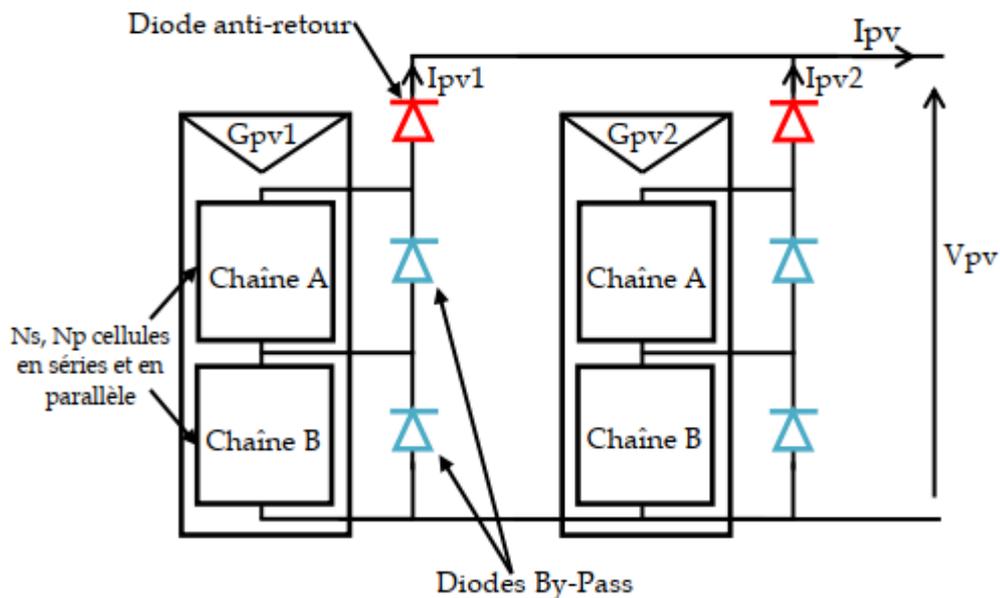


**Figure I. 18:** Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules PV.

### I.3.10.1 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Pour augmenter la durée de vie d'une installation PV, elle nécessite une protection électrique contre les pannes destructrices liées au regroupement des modules. Deux types de protections sont utilisés [14] comme illustré dans la Figure.1.19.

- Protection contre les courants négatifs lors de regroupement en série des panneaux PV (diode anti-retour).
- Protection contre les points chauds lors de regroupement en parallèle des panneaux PV (diode by-pass).



**Figure I. 19:** Association de deux générateurs PV en parallèles avec les diodes de protections.

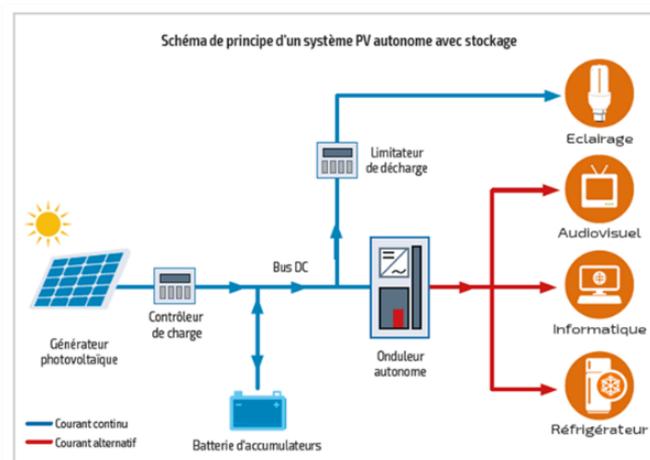
### I.3.11 Système d'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont une technologie de production d'énergie à partir de l'énergie solaire. Ces systèmes utilisent des cellules solaires pour convertir les rayons du soleil le système photoélectrique nécessite la lumière du jour pour fonctionner, mais il n'est pas nécessaire d'avoir la lumière directe du soleil. Les panneaux solaires peuvent produire de l'électricité tant qu'ils sont situés dans un endroit non ombragé et tant qu'ils sont installés à l'angle d'inclinaison approprié (pour mieux faire face au soleil), vous obtiendrez plus d'énergie [15].

Le mode d'utilisation d'un système solaire est basé sur les exigences techniques, économiques et géométriques. Alors, il y a, principalement, trois modes : **autonome**, **hybride** et **raccordée au réseau** [16].

- **Système autonome**

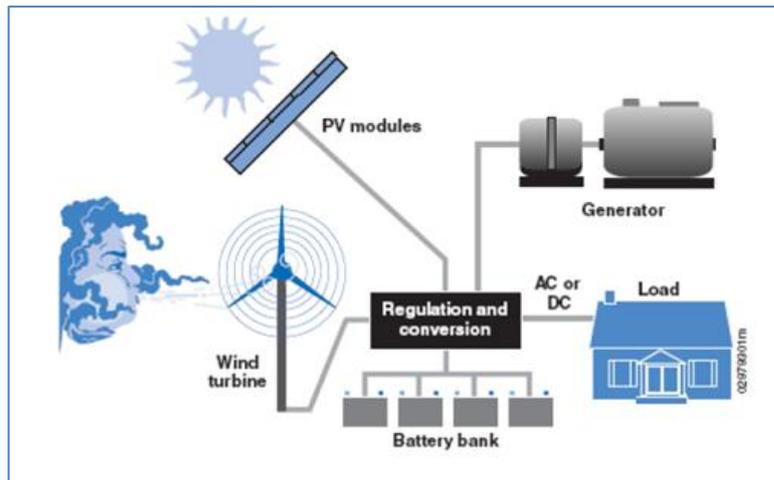
Les systèmes autonomes sont installés pour alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Un tel mode d'utilisation nécessite, généralement, l'insertion d'un système de stockage associé aux générateurs photovoltaïques(PV) afin d'assurer l'alimentation, à chaque instant de la journée et la nuit et pendant plusieurs jours quelques soient les conditions météorologiques.



**Figure I. 20:** Schéma synoptique d'un système autonome [17].

- **Système hybrides**

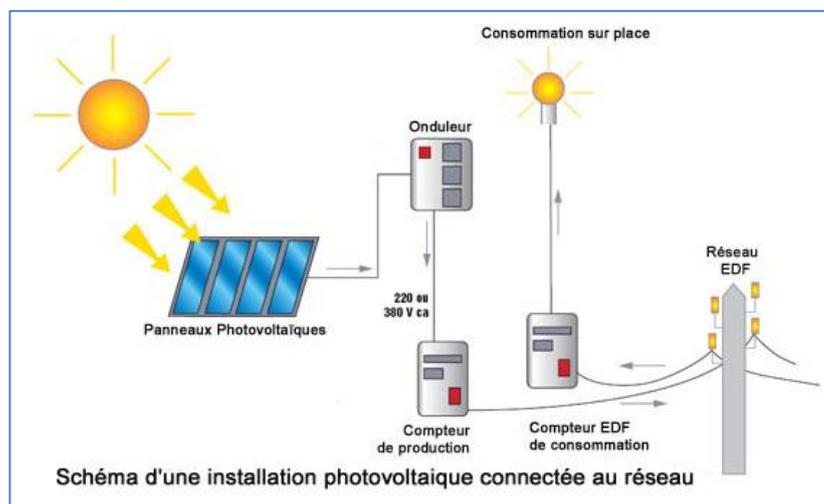
Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires. Ils sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique, le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie.



**Figure I. 21:** Schéma synoptique d'un système hybride.

- **Système PV raccordé au réseau**

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des chaînes (strings en anglais) eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings. Si la consommation locale.



**Figure I. 22:** Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau.

### **I.3.12 Avantage et inconvénient d'une installation PV**

Les avantages et inconvénients de système PV sont résumés comme suit :

## a Avantage

- **Énergie propre** : les cellules photovoltaïques génèrent une énergie propre et verte car aucun gaz nocif tel que CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc. n'est émis. De plus, ils ne produisent aucune pollution sonore, ce qui les rend idéaux pour une application dans des zones résidentielles.

Economiquement viable : les coûts de fonctionnement et de maintenance des cellules sont très faibles. Le coût du panneau solaire engagé n'est que le coût initial, c'est-à-dire l'achat et l'installation.

- **Renouvelable** : l'énergie est gratuite et abondante dans la nature.
- **Coût** : Les panneaux solaires n'ont pas de pièces mobiles mécaniquement, sauf dans certaines bases mécaniques de suivi du soleil très avancées. Par conséquent, le prix des panneaux solaires pour l'entretien et la réparation est négligeable.
- **Accessible** : Les panneaux solaires sont faciles à installer et peuvent être rendus accessibles dans des endroits éloignés ou dans des zones peu peuplées à moindre coût par rapport aux lignes de transmission conventionnelles. Ils sont faciles à installer sans aucune interférence avec le mode de vie résidentiel [11].

## b Inconvénients des cellules photovoltaïques

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-17 %.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.[12]

## I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les bases essentielles pour la compréhension des énergies renouvelables et l'énergie solaire en particulier. Un aperçu a été donné sur les aspects généraux des systèmes photovoltaïques (rayonnement solaire et conversion photovoltaïque) et les propriétés. Ainsi, nous avons illustré les différentes technologies de cellules PV existantes dans la littérature, la modélisation d'une cellule PV. Enfin, on a cité les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques.

# Chapitre II Etage d'adaptation et commande MPPT

---

## II.1 Introduction

Les performances d'un générateur photovoltaïque sont influencées par les conditions climatiques telles que l'éclairement solaire et la température. La poursuite du point de puissance maximale (MPPT) est essentielle pour maximiser la production d'énergie, et elle est réalisée par la commande du rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC situé entre le panneau solaire et la charge.

Pour mettre en évidence le rôle crucial de l'étage d'adaptation dans un système de connexion d'un générateur photovoltaïque, il est important de comprendre les deux types de connexions possibles pour un générateur photovoltaïque.

Dans ce contexte, nous nous concentrons sur l'étude et la simulation d'un hacheur Boost. Il permet d'augmenter la tension de sortie du panneau solaire pour l'adapter aux exigences de la charge.

Différentes techniques de recherche du point de puissance maximale existent pour la commande MPPT. Ces techniques sont utilisées pour trouver et maintenir le point de puissance maximale malgré les variations des conditions d'ensoleillement. Certaines des techniques les plus couramment utilisées incluent Perturb& Observe (P&O), Incrémental Conductance, et les algorithmes basés sur les réseaux de neurones ou les algorithmes génétiques.

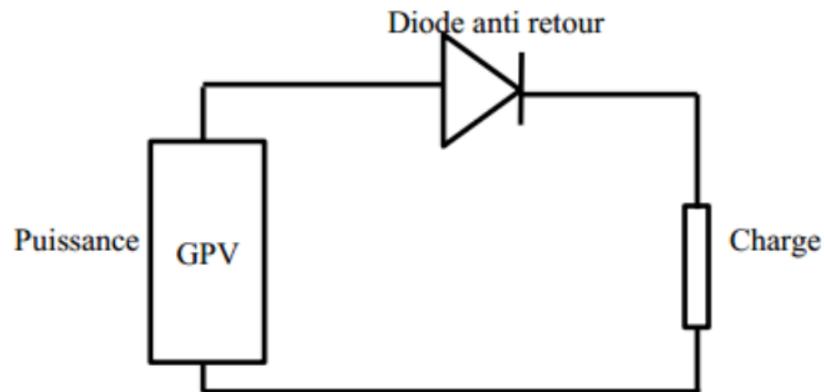
## II.2 Connexion d'un GPV

La connexion d'un générateur photovoltaïque (GPV) fait référence à la manière dont les panneaux solaires sont reliés au reste du système électrique. Il existe deux types de connexions couramment utilisées pour les GPV :

- Connexion directe générateur photovoltaïque-charge.
- Connexion indirecte GPV-Hacheur-charge. [13]

## II.2.1 Connexion directe

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque GPV et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite du GPV, cette énergie est dépendante fortement de l'éclairement, de la nature de la charge et de la température. La figure II .1 montre ce cas.



**Figure II. 1:** Connexion directe entre un GPV et une charge.

Ce choix de configuration est principalement motivé par plusieurs avantages clés :

- **Simplicité** : Cette configuration est très simple à mettre en place car elle ne nécessite pas de composants supplémentaires tels qu'un onduleur ou une batterie. Les panneaux solaires du GPV sont directement connectés à la charge, ce qui réduit la complexité de l'installation.
- **Fiabilité** : Moins de composants signifie également moins de points de défaillance potentiels. Dans ce système simple, il y a moins de risques de pannes ou de dysfonctionnements, ce qui augmente la fiabilité globale du système.
- **Coût** : La simplicité de cette configuration se traduit par des coûts réduits. Moins de composants signifie moins de dépenses en équipements et en maintenance. De plus, l'absence de batterie réduit les coûts associés à l'entretien et au remplacement de celle-ci.

L'inconvénient de cette configuration, est l'absence de réglage du fonctionnement du système et l'absence de garantie du transfert de la puissance optimale disponible du GPV vers la charge.

- **Absence de réglage du fonctionnement** : Dans cette configuration, il n'y a pas de dispositif de réglage ou de contrôle pour optimiser le fonctionnement du système.

Cela signifie que la charge ne peut pas bénéficier d'une gestion sophistiquée de l'énergie solaire pour maximiser l'efficacité ou répondre aux besoins spécifiques de la charge. Par exemple, il n'y a pas de mécanisme pour suivre le point de puissance maximale (MPPT) et ajuster la tension ou le courant de sortie du GPV en conséquence.

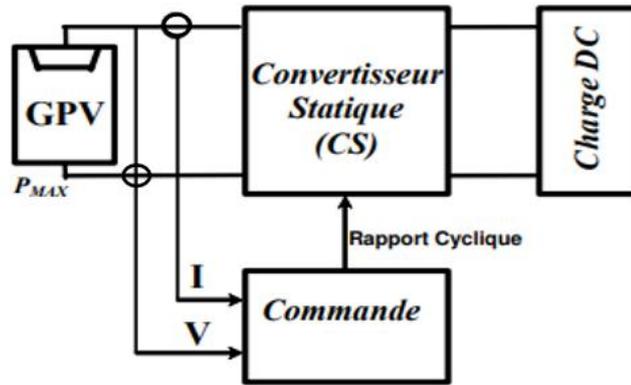
- **Transfert de puissance non garanti** : Dans cette configuration, le transfert de la puissance optimale disponible du GPV vers la charge n'est pas garanti. La puissance fournie à la charge dépend directement de l'éclairement solaire, de la température et de la nature de la charge elle-même. Par conséquent, lorsque les conditions d'éclairement varient, la puissance fournie à la charge peut également fluctuer, ce qui peut affecter les performances et la stabilité de la charge.[14]

Il est important de prendre des précautions pour éviter tout dommage au générateur en raison d'un retour de courant. Pour ce faire, une diode anti-retour, également connue sous le nom de diode de blocage ou de diode de protection, est souvent utilisée.

La diode anti-retour est placée entre la source (le GPV) et la charge. Son rôle principal est d'empêcher le courant de retour de la charge de circuler vers le GPV. Lorsque le GPV produit de l'énergie et fournit du courant à la charge, la diode anti-retour se comporte comme une voie à faible résistance, permettant au courant de circuler normalement du GPV vers la charge.

## **II.2.2 Connexion indirecte GPV-Hacheur-charge**

La connexion indirecte d'un générateur photovoltaïque (GPV) se réfère à la configuration où le GPV est relié à une charge via un hacheur, également connu sous le nom de convertisseur DC-DC. Cette configuration offre plus de flexibilité et de contrôle sur la manière dont l'énergie solaire est utilisée. Dans une connexion indirecte GPV-hacheur-charge illustrée par la Figure II.2, le hacheur est placé entre le GPV et la charge pour réguler et adapter la tension et le courant du GPV aux besoins spécifiques de la charge. Le hacheur est un dispositif électronique qui utilise des commutations rapides pour modifier la tension et le courant d'un circuit électrique.



**Figure II. 2:** GPV-Etage d'adaptation-charge.

En utilisant un hacheur, il est également possible de réguler la puissance transmise à la charge en ajustant le rapport cyclique du hacheur. Le rapport cyclique représente la proportion de temps pendant laquelle le hacheur est activé (en position fermée) par rapport à la période totale de commutation. En modifiant le rapport cyclique, on peut contrôler la quantité d'énergie transmise à la charge, permettant ainsi une adaptation plus précise des caractéristiques de sortie du GPV aux besoins de la charge.

La connexion indirecte GPV-hacheur-charge offre plusieurs avantages, notamment :

- **Adaptation de tension et de courant** : Le hacheur permet de convertir la tension et le courant du GPV pour les rendre compatibles avec les exigences spécifiques de la charge. Cela permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire et de maximiser l'efficacité du système.
- **Contrôle de la puissance** : En ajustant le rapport cyclique de le hacheur, on peut réguler la quantité d'énergie transmise à la charge, ce qui permet un meilleur contrôle de la puissance fournie par le GPV.
- **Flexibilité** : La configuration avec un hacheur offre une plus grande flexibilité dans le choix des charges pouvant être alimentées par le GPV. Il est possible de connecter des charges nécessitant des tensions ou des courants différents, ce qui permet une utilisation plus polyvalente de l'énergie solaire.

Cependant, il est important de noter que la conception et la mise en œuvre d'une connexion indirecte GPV-hacheur-charge nécessitent une analyse approfondie des spécifications du GPV, des caractéristiques de la charge et des conditions de fonctionnement du système. Des considérations telles que le dimensionnement de le

hacheur, la gestion thermique et la sécurité doivent être prises en compte pour assurer un fonctionnement fiable et efficace du système.

Par définition, une commande, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum.[15]

## II.3 Convertisseurs DC-DC

Un hacheur permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension.

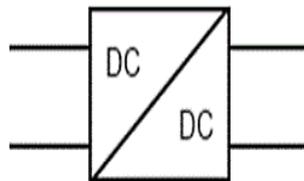


Figure II. 3: Symbole d'un convertisseur DC-DC.

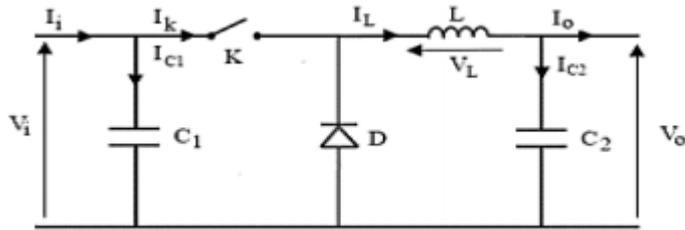
On distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs) :

- ✓ **Hacheur abaisseur (BUCK),**
- ✓ **Hacheur élévateur (BOOST),**
- ✓ **Hacheur abaisseur-élévateur (BUCK-BOOST).**

Ainsi, on s'est intéressé au convertisseur BOOST dans la simulation de la commande MPPT. [18]

### II.3.1 Hacheur BUCK

Le convertisseur BUCK peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

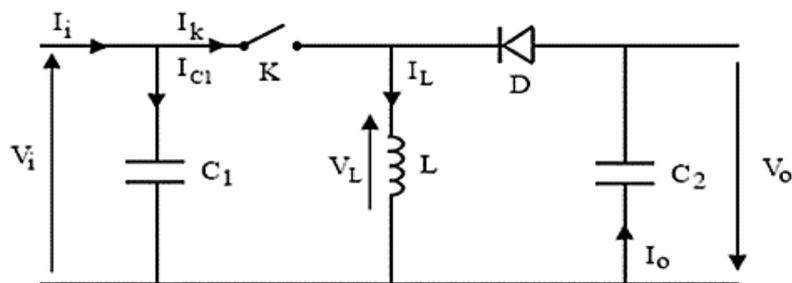


**Figure II. 4:** Schéma électrique d'un hacheur BUCK.

### II.3.2 Hacheur BUCK-BOOST

Un convertisseur BUCK-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

C'est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).



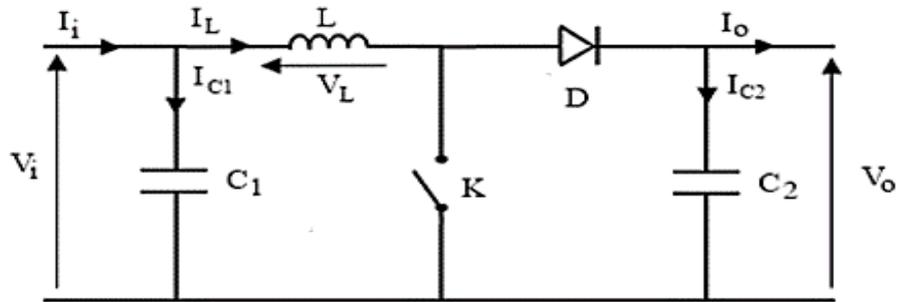
**Figure II. 5:** Schéma électrique d'un hacheur BUCK-BOOST.

### II.3.3 Hacheur BOOST

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de hacheur parallèle. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être

remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).[19]



**Figure II. 6:** Schéma électrique d'un hacheur BOOST.

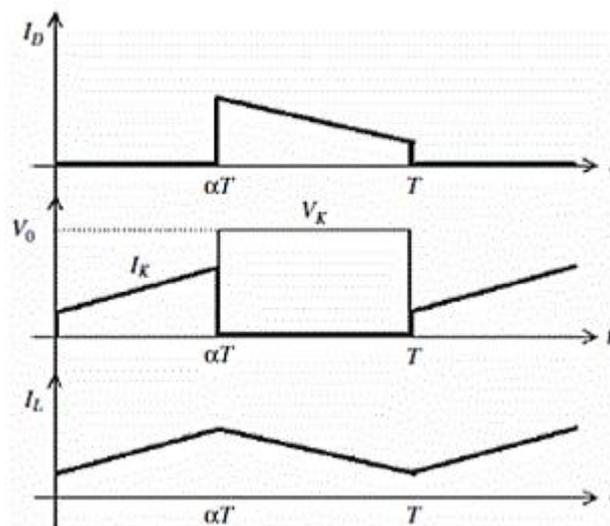
### II.3.3.1 Fonctionnement du hacheur Boost

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée  $\alpha T_e$ , le courant dans l'inductance croît linéairement (figure. II.7). La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps  $t = [\alpha T_e, T_e]$ , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D.

La tension et le courant de la charge dans le cas de la conduction continue sont donnés par :

$$V_0 = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_i \quad \text{II.1}$$

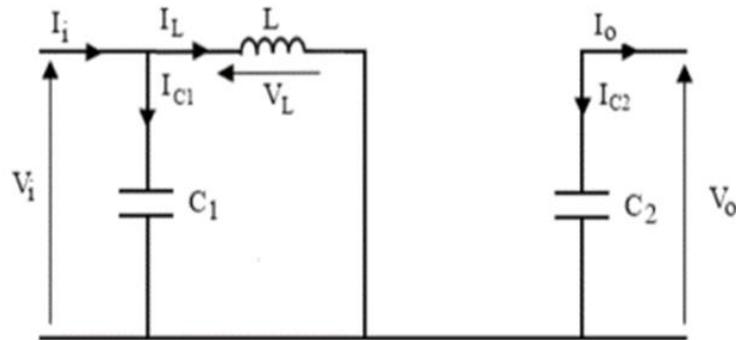
$$I_0 = (1 - \alpha) \cdot I_L \quad \text{II.2}$$



**Figure II. 7:** Chronogrammes du courant et de la tension d'un hacheur BOOST.

## II.4 Modèle mathématique équivalent

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. Celui de la figure (II.8), présente le circuit équivalent du BOOST lorsque K est fermé c'est-à-dire entre  $[0, \alpha T_e]$  [20].



**Figure II. 8:** Schéma électrique d'un hacheur BOOST fermé.

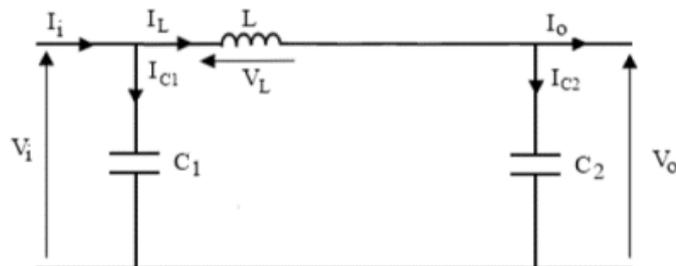
L'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{II.3}$$

$$I_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad \text{II.4}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad \text{II.5}$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent du BOOST est donné comme suit :



**Figure II. 9:** Schéma électrique d'un hacheur BOOST ouvert.

$$I_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{II.6}$$

$$I_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = I_L - I_o(t) \quad \text{II.7}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \text{II.8}$$

Le rapport de transformation de hacheur boost et donner par l'expression suivante :

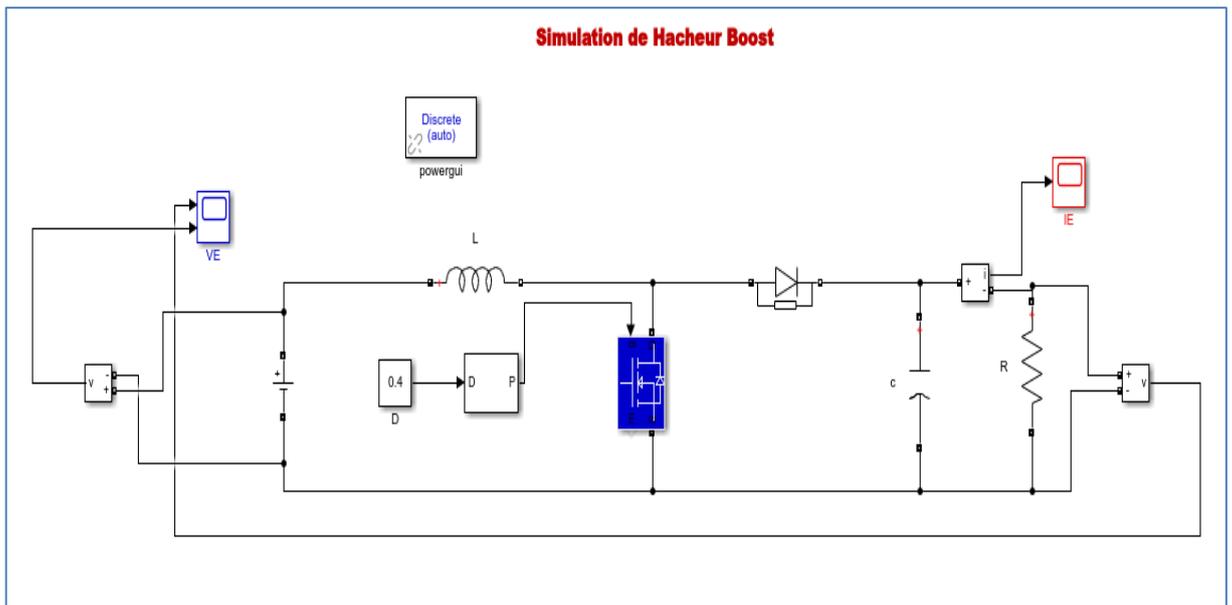
$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad \text{II.9}$$

## II.5. Simulation du hacheur BOOST

Les simulations du modèle BOOST sans et avec GPV en fixant le rapport cyclique sont réalisées dans ce qui va suivre.

### II.5.1 Simulation du hacheur BOOST sans PV

Le modèle BOOST simulé sous l'environnement Matlab/Simulink sans GPV avec un rapport cyclique fixé à 0.4 est illustré par la figure II.10. Le tableau II.1 donne les valeurs déterminées par essai/erreur du hacheur Boost simulé dans la figure II.10.



**Figure II. 10** : Schéma bloc de simulation d'un modèle hacheur Boost.

Les valeurs du hacheur Boost utilisées dans la simulation pour un rapport cyclique fixe sont résumées comme suit :

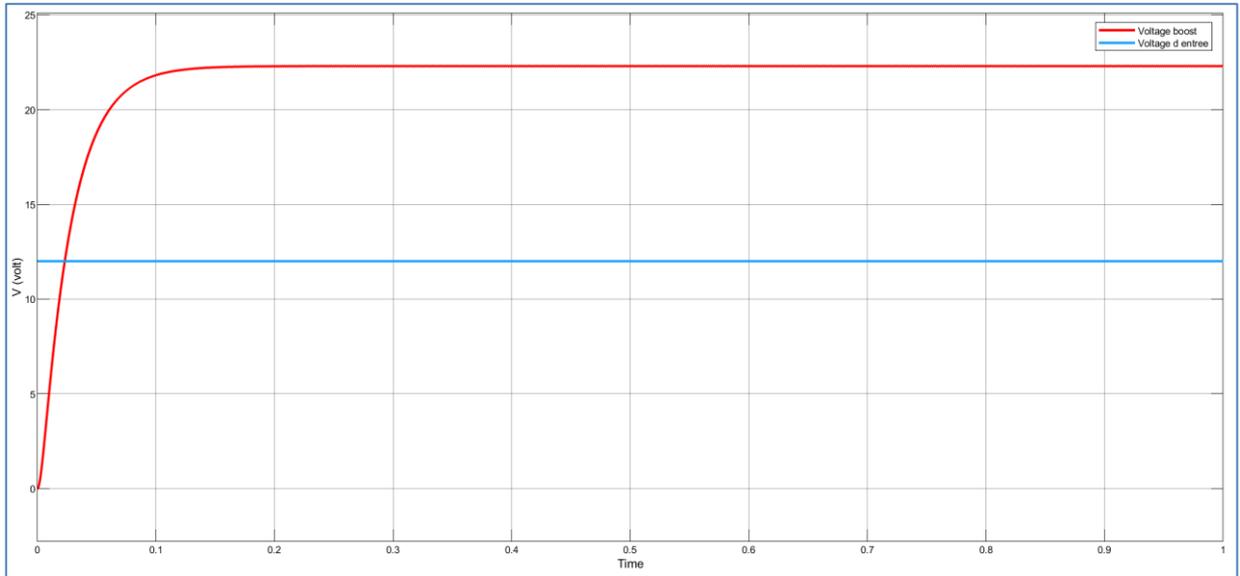
<b>L(H)</b>	<b>C (F)</b>	<b>R(Ω)</b>	<b>α</b>
1.2. e <sup>-5</sup>	5.52. e <sup>-4</sup>	1.67	0.4

**Tableau II. 1:** Valeurs du vecteur Paramètres Boost.

La tension de sortie est calculée comme suit:

$$V_0 = \frac{1}{1 - 0.4} \cdot 12.5$$

$$V_0 = 20.83v$$



**Figure II. 11:** Tension d'entrée  $V_i$  et de sortie  $V_0$  d'un hacheur DC-DC BOOST.

D'après la figure (II.11) on remarque que le circuit effectué correctement son rôle car la tension de sortie est supérieure à celle de l'entrée.

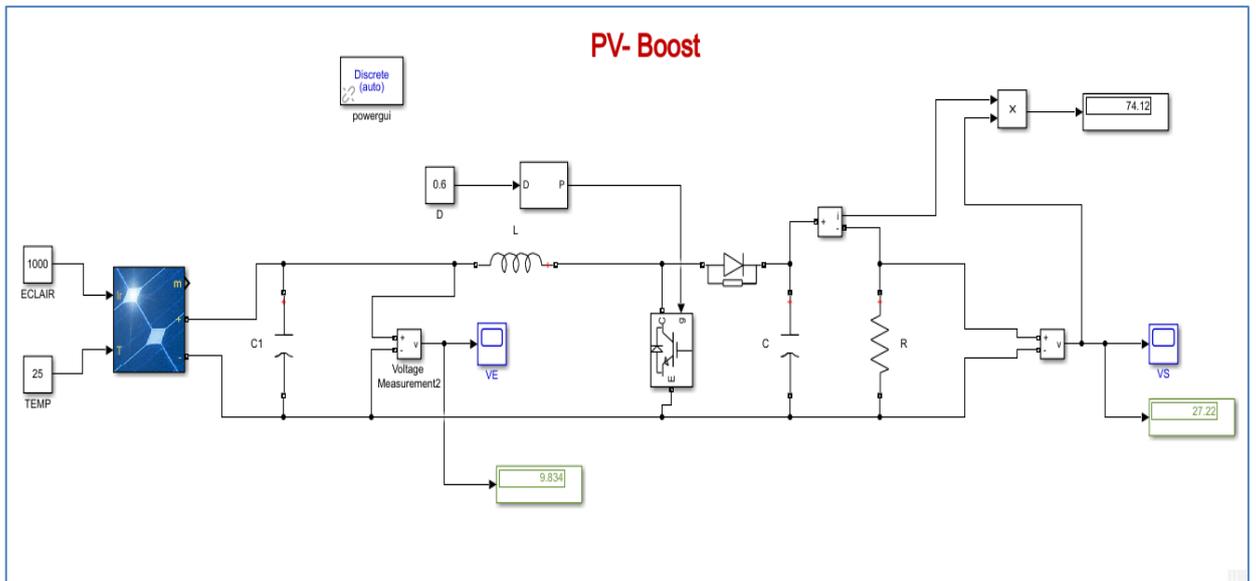
### II.5.2 Simulation du hacheur BOOST avec PV

Le modèle de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink du hacheur boost avec GPV est donné par la figure II.12.

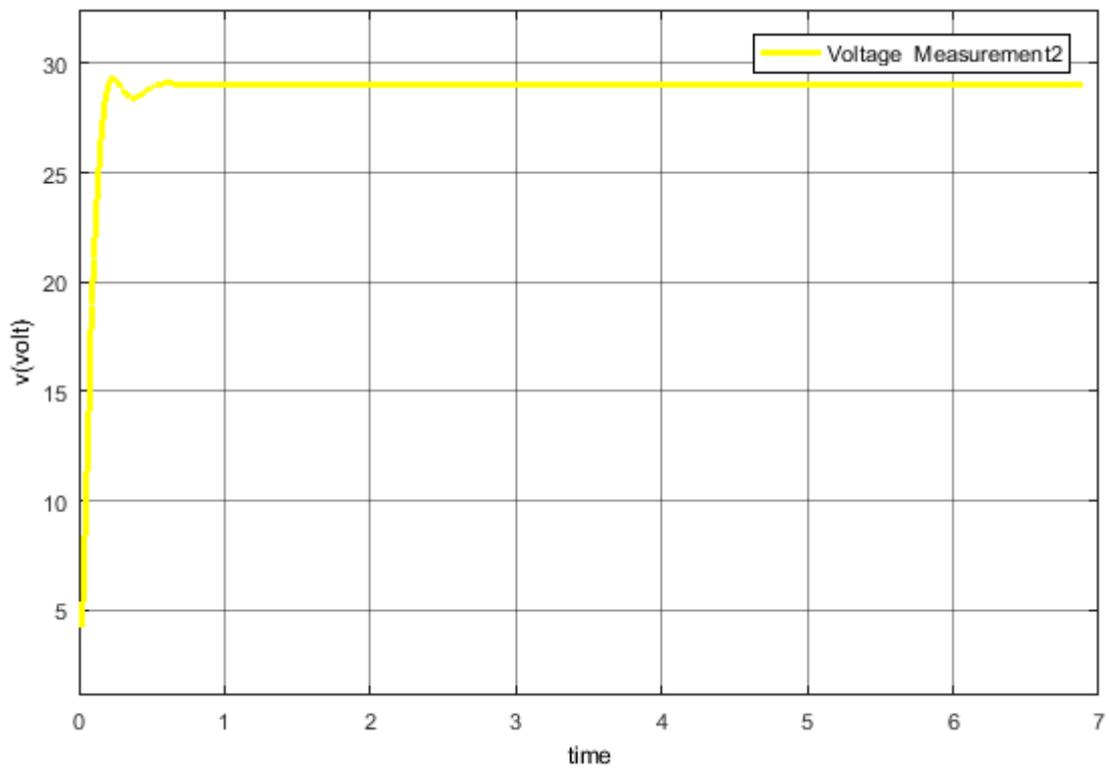
Les paramètres de la simulation sont répertoriés dans le tableau. II.2. Les résultats du modèle de simulation sont illustrés par les figures II.13 et II.14.

$\alpha$	$V_i$ (F)	$R(\Omega)$	$L(H)$	$C2(F)$	$C1(F)$
0.37	29	10	330e-3	430e-5	330e-4

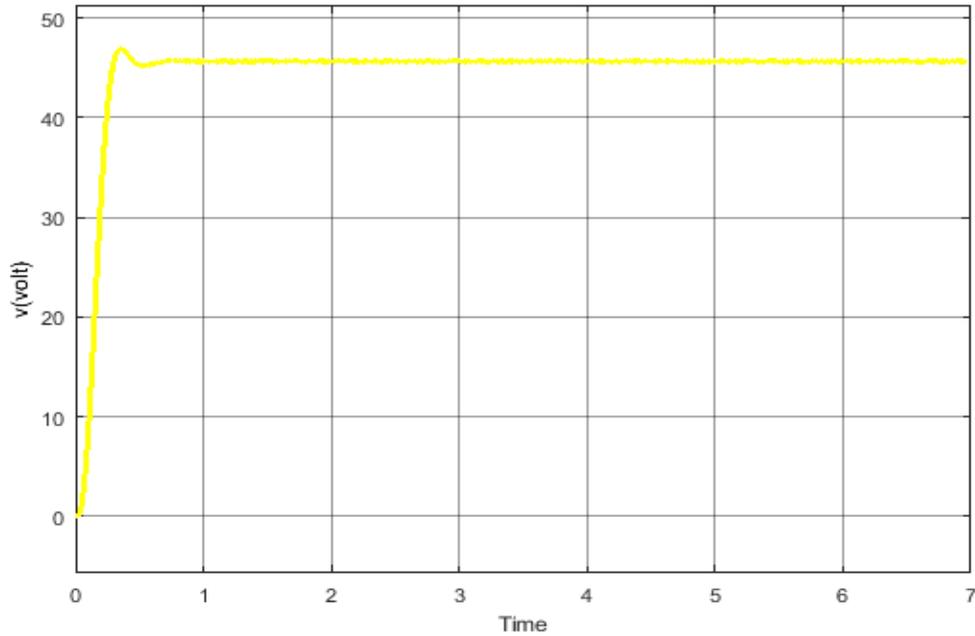
**Tableau II. 2:** Paramètres de simulation.



**Figure II. 12:** Schéma bloc de simulation d'un modèle PV -Hacheur Boost



**Figure II. 13:** Allure de la tension d'entrée  $V_i$  du PV - hacheur BOOST



**Figure II. 14:** Allure de tension sortie du PV V0- hacheur BOOST.

La tension de sortie est calculée comme suit:

$$V_0 = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot V_i$$

$$V_0 = \frac{1}{1 - 0.37} \cdot 29$$

$$V_0 = 45.82v$$

Les résultats de simulation montrent que le convertisseur élévateur DC-DC a augmenté la tension de sortie par rapport à l'entrée.

## II.6 Poursuite Du Point De Puissance Maximale D'un Système Photovoltaïque

Diverses publications sur le fonctionnement des commandes de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque.

Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes techniques MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base.

La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative. [21]

## II.6.1 Techniques de recherche du point de puissance maximal MPPT

Plusieurs techniques de recherche du point de puissance maximal MPPT existent dans la littérature. On peut distinguer principalement deux catégories :

- Techniques conventionnelles.
- Techniques avancées.

### II.6.1.1 Techniques conventionnelles

Les techniques MPPT conventionnelles pour maximiser la puissance de sortie des panneaux solaires sont données comme suit :

- a. Perturbation & observation.
- b. Conductance incrémentation.
- c. Hill climbing.

#### a. Perturbation & observation (P&O)

Le principe consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (II.15), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM.

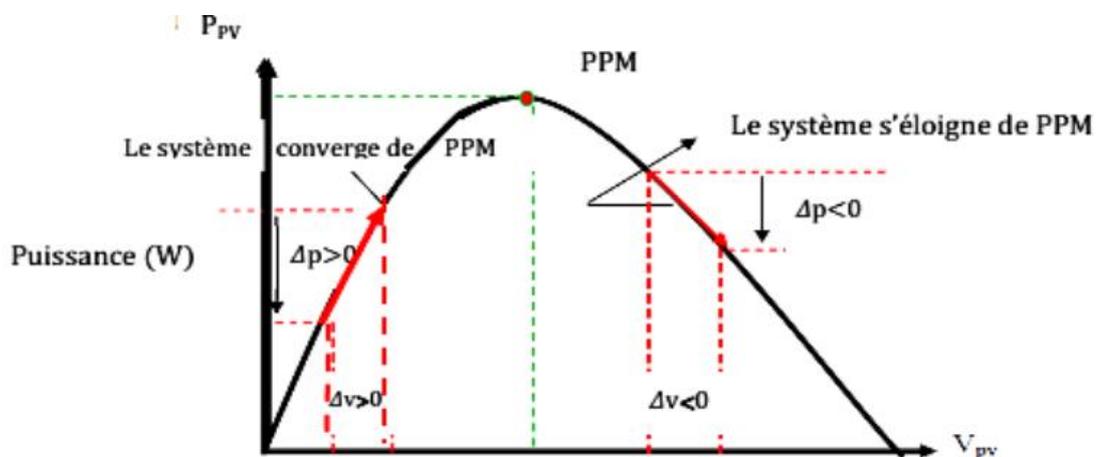


Figure II. 15: Application de l'algorithme P&O sur la caractéristique PPV(VPV) [22].

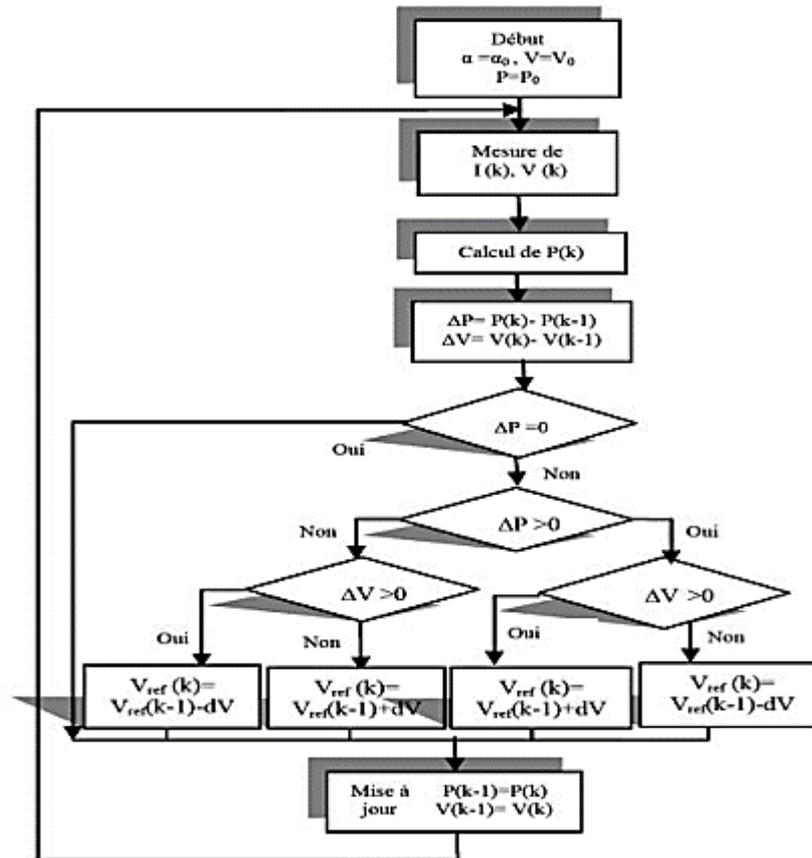


Figure II. 16: Organigramme de l'algorithme 'P&O'.

### b. Conductance incrémentation

Cette technique est basée sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

( $G=I/V$ ) Donc une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :  
( $\Delta G = d_I / d_V$ )

D'autre part, l'évolution de la puissance du GPV par rapport à la tension donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite

Si  $\frac{dP}{dV} > 0$ , le point de fonctionnement est à gauche du PPM

Si  $\frac{dP}{dV} < 0$ , le point de fonctionnement est à droite du PPM

Si  $\frac{dP}{dV} = 0$ , le point de fonctionnement est sur le PPM

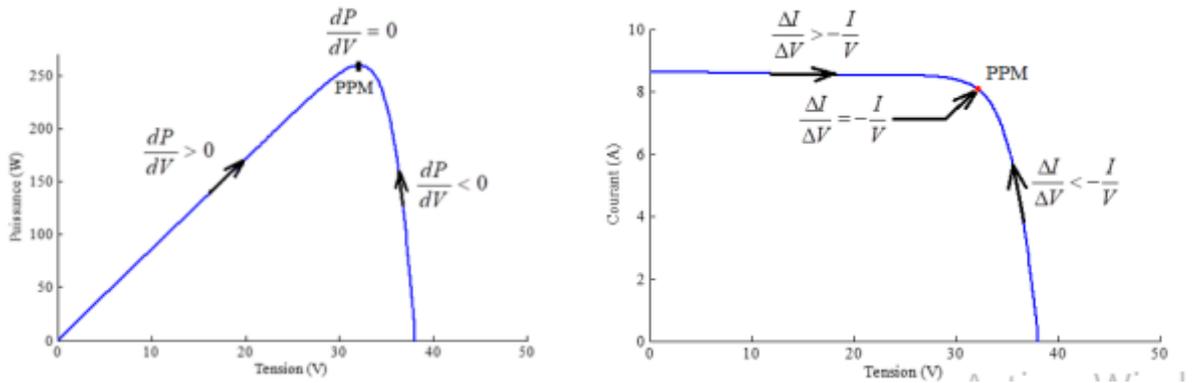


Figure II. 17: Méthode IncCond pour poursuivre le MPP [23]

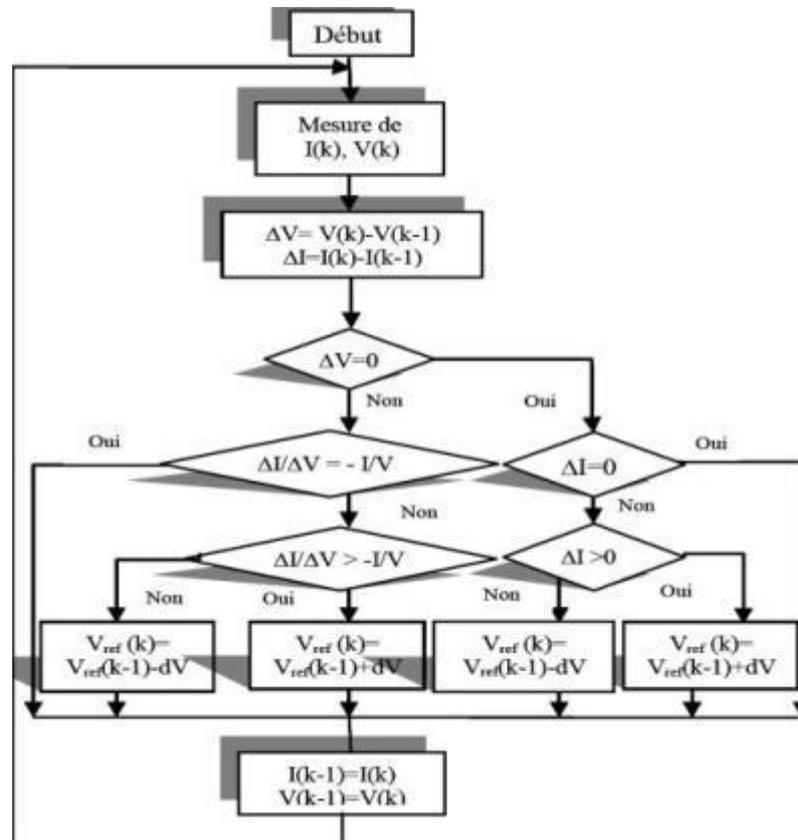


Figure II. 18: Organigramme de l'algorithme 'INC'.

### c. Principe des commandes « Hill Climbing »

La technique de contrôle nommée (Hill Climbing) consiste à faire monter le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au  $C_s$ . Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque  $dP_{pv}/d\alpha$  est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure (II.19).

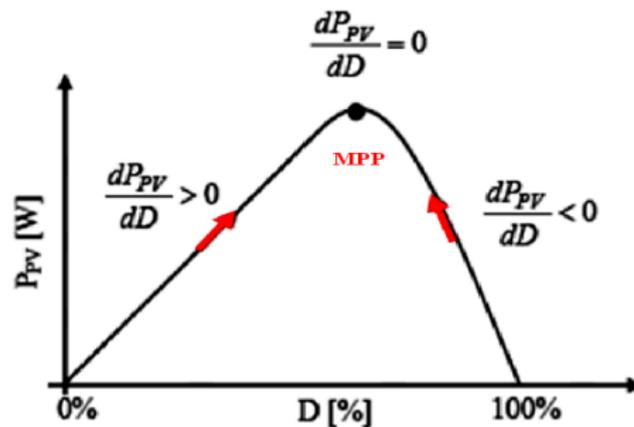


Figure II. 19: Relation entre PPV et le rapport cyclique D du convertisseur statique [17].

#### II.6.1.2 Techniques avancées

Des recherches sont en cours pour développer des techniques MPPT avancées qui vont au-delà des méthodes classiques. Ces techniques sont divisées en trois sous-catégories suivantes :

- a. Techniques basées sur l'intelligence artificielle.
- b. Techniques basées sur les métaheuristiques.
- c. Contrôle non linéaire.

##### a. Techniques basées sur l'intelligence artificielle

Les techniques basées sur l'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, les systèmes experts, etc., sont utilisées pour améliorer les performances de la commande MPPT. Ces techniques permettent de modéliser et d'optimiser le comportement du système MPPT en utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique. Elles peuvent prendre en compte des variables complexes et des relations non linéaires pour ajuster les paramètres du convertisseur de manière plus précise et réactive.

## **b. Techniques basées sur les métaheuristiques**

Les métaheuristiques sont des techniques d'optimisation inspirées de phénomènes naturels ou de comportements d'animaux. Des méthodes telles que l'optimisation par essaim de particules (PSO), l'algorithme génétique, l'optimisation par colonie de fourmis, etc., sont appliquées à la commande MPPT pour rechercher efficacement le point de puissance maximale. Ces techniques permettent d'explorer rapidement l'espace de recherche et de trouver des solutions proches de l'optimum global.

## **c. Contrôle non linéaire**

Les techniques de contrôle non linéaire, telles que le contrôle flou, le contrôle prédictif, etc., sont également utilisées pour améliorer la performance de la commande MPPT. Ces méthodes prennent en compte les non-linéarités du système et utilisent des approches avancées de modélisation et de commande pour ajuster les paramètres du convertisseur de manière plus précise et dynamique. Elles permettent de réagir rapidement aux variations des conditions environnementales et d'optimiser la production d'énergie solaire.

Ces techniques avancées de MPPT sont encore en développement et font l'objet de recherches actives. Elles visent à améliorer la précision, la réactivité et l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie solaire, en maximisant la production d'énergie et en optimisant l'utilisation des ressources disponibles.

## **II.7 Conclusion**

L'utilisation d'un étage d'adaptation et d'une commande MPPT est essentielle pour optimiser les performances d'un générateur photovoltaïque. L'étage d'adaptation ajuste la tension et le courant du panneau solaire pour répondre aux besoins de la charge, améliorant ainsi l'efficacité du système. La commande MPPT utilise des techniques de recherche pour maintenir le point de puissance maximale malgré les variations des conditions d'ensoleillement, optimisant ainsi la production d'énergie. La connexion directe offre simplicité et fiabilité, mais limite le réglage du système. La connexion indirecte via un convertisseur DC-DC offre plus de flexibilité et de contrôle pour adapter les caractéristiques de sortie du générateur aux besoins de la charge. Cependant, cela nécessite une analyse approfondie pour assurer un fonctionnement fiable et efficace. Différents types

de convertisseurs DC-DC, comme le BUCK et le BOOST, permettent de réguler la tension et le courant en fonction des besoins. En résumé, l'utilisation d'un étage d'adaptation avec un convertisseur DC-DC et une commande MPPT maximise la production d'énergie, améliore l'efficacité et offre plus de flexibilité et de contrôle. La conception doit tenir compte des spécifications du générateur, des caractéristiques de la charge et des conditions de fonctionnement.

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur les simulations de commande basées sur la logique floue pour différentes fonctions d'appartenance en entrée du système photovoltaïque. Les fonctions d'appartenance permettent de définir les valeurs de la variable d'entrée en fonction de la mesure ou de l'état du système.

### III.2 Présentation de la logique floue

La logique floue (fuzzylogic) a fait son apparition en 1965 avec les travaux de Lotfi Zadeh. Ce dernier a formalisé la représentation et le traitement de connaissance imprécises ou approximatives afin de traiter des systèmes de grande complexité ou mal connus [23].

#### III.2.1 Historique

En 1973, le professeur Zadeh publie un article dans l'IEEE (L'Institute of Electrical and Electronics Engineers), il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques (dont la valeur est un mot et non un nombre). En 1974, Mamdani (Université de Londres) réalise un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur. Dans les années 80, plusieurs applications commencent à émerger (notamment au Japon). Elle a été utilisée dans plusieurs domaines variés de contrôle et de régulation [24].

#### III.2.2 Principe de la logique floue

La logique floue, également connue sous le nom de fuzzylogic en anglais, est un domaine de recherche important qui attire l'attention de nombreux chercheurs. Elle trouve des applications dans divers secteurs, tels que les produits grand public (appareils photo, machines à laver, fours à micro-ondes, etc.) et l'industrie (régulation et contrôle de processus complexes liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à la robotique, aux machines-outils).

La logique floue est une alternative à la logique binaire traditionnelle, où les variables peuvent prendre des valeurs intermédiaires entre vrai (1) et faux (0) avec une certaine probabilité, représentant un degré d'appartenance. Les avantages de la commande floue par rapport aux méthodes de commande classiques résident principalement dans la conception des régulateurs. En effet, ces régulateurs ne nécessitent pas la connaissance des modèles mathématiques précis du système, mais plutôt une série de règles basées sur l'expertise d'un opérateur qualifié qui manipule le système.

La logique floue a connu un intérêt croissant depuis l'introduction des sous-ensembles flous par Zadeh en 1965. En 1974, Mamdani a introduit la commande floue pour la régulation des processus industriels. Dans les années 80, la commande floue a connu une expansion significative au Japon, notamment grâce aux travaux de Sugeno. La logique floue permet de combiner la modélisation numérique et la modélisation symbolique, ce qui a permis des avancées spectaculaires dans le domaine industriel en traduisant simplement les connaissances symboliques en entités numériques et vice versa. Son avantage réside dans sa capacité à utiliser des règles linguistiques simples pour traduire facilement l'expertise d'un spécialiste et résoudre des problèmes spécifiques.

### **III.3 Utilisations de la logique floue pour le contrôle**

L'utilisation de la logique floue dans le contrôle présente de nombreux avantages et applications dans divers domaines. La logique floue est une approche qui permet de modéliser et de traiter des informations incertaines, imprécises ou linguistiques, ce qui la rend particulièrement adaptée pour des systèmes complexes et variables.

#### **III.3.1 Contrôleur flou**

Un contrôleur flou, également connu sous le nom de système de commande floue, est un système de contrôle basé sur la logique floue (LF) pour réguler un système en tenant compte de l'incertitude, de l'imprécision et des variations des conditions environnementales. Contrairement aux systèmes de contrôle traditionnels qui utilisent des modèles mathématiques précis et des règles binaires, un contrôleur flou utilise des règles linguistiques et des ensembles flous pour prendre des décisions.

Récemment, la commande à base de la logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale. Cette commande offre l'avantage d'être une

commande robuste et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.

Défuzzification permet à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur réelle de sortie, figure (III.1).

La figure (III.1), montre la configuration du contrôleur flou qui se compose des : Entrées, Sortie d'échelle, fuzzification, décision floue inférence, et la défuzzification.[26]

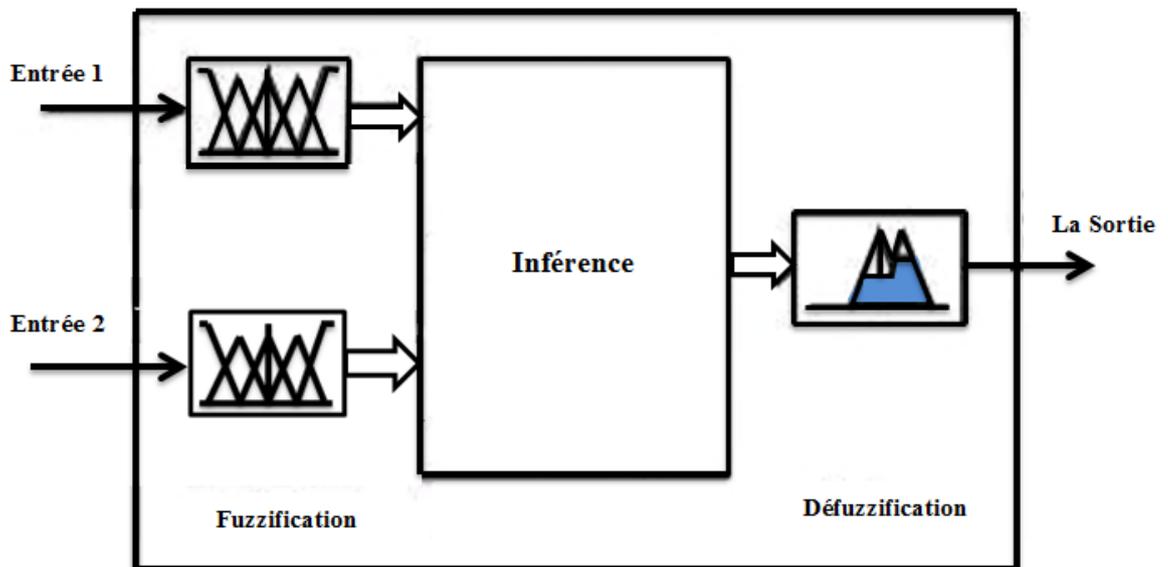


Figure III. 1: Schéma block de l'algorithme à base de logique floue.

### III.4 Résultats de la simulation

Dans la simulation sous l'environnement Matlab-Simulink, le module photovoltaïque 1soltech 1sth-215-p utilisé est caractérisé par les données du tableau suivant :

Paramètre du PV	Symbole	Valeur
Puissance maximale	Vmp (V)	213.15
Courant de Puissance maximale	Imp (A)	7.35
Courant de court circuit	Isc (A)	7.84
Tension de Puissance maximale	Vmp (V)	29
Tension decircuit ouvert	Voc (V)	36.3

Tableau III. 1: Les caractéristiques du pvsoltech 1soltech-215-p.

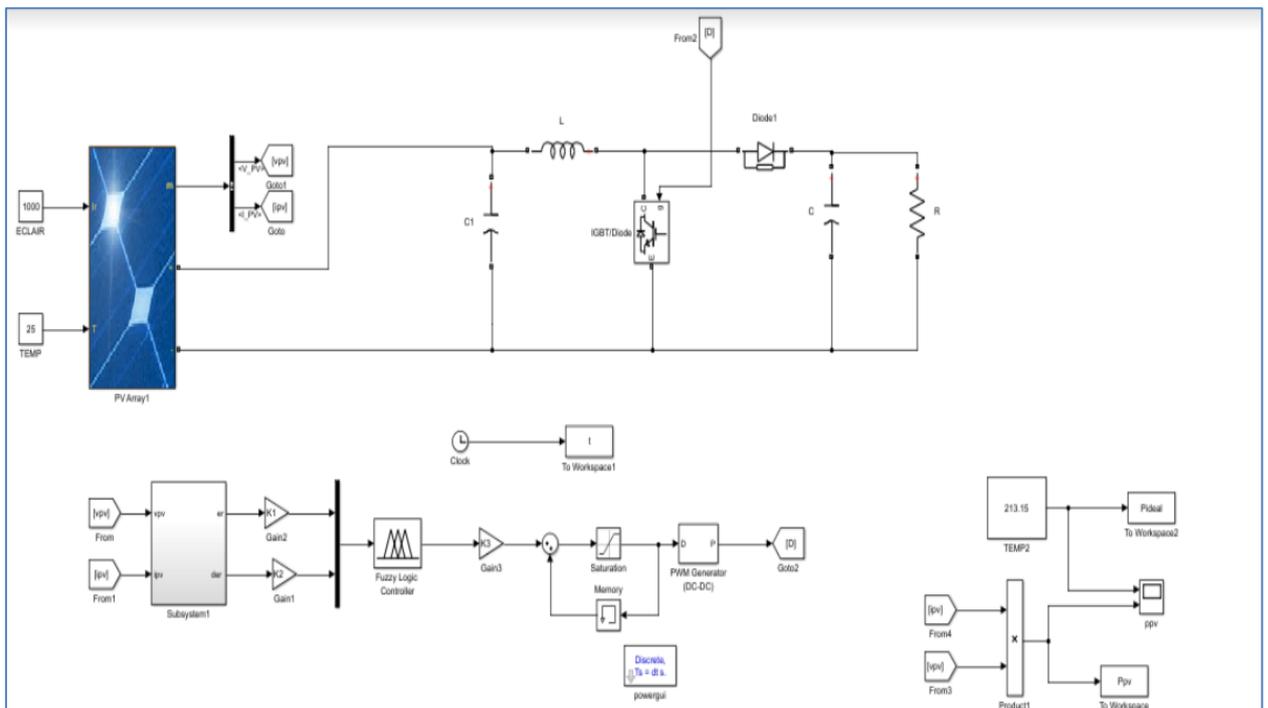
Les paramètres du hacheur boost déterminés par essai/erreur sont donnés comme suit :

Paramètres	Valeurs
<b>C1</b>	60e-6
<b>L</b>	30e-3
<b>C2</b>	5e-6
<b>R</b>	5

**Tableau III. 2:** Les paramètres du hacheur boost.

Ces paramètres sont importants pour la modélisation et la conception du système logique floue qui sera utilisé pour le contrôle et l'optimisation du point de puissance maximale (MPPT) dans le système photovoltaïque. Ils permettent de prendre en compte les caractéristiques spécifiques du système et de les intégrer dans les règles et les fonctions du système logique floue.

La figure III.2 représente la structure MATLAB SIMULINK d'un système de commande logique.

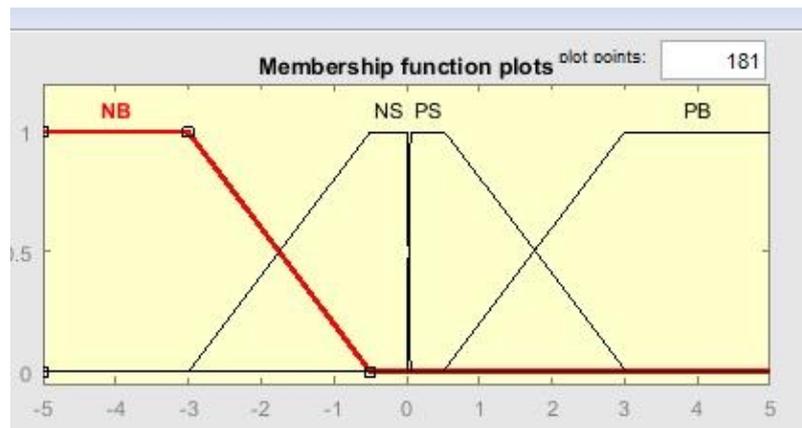


**Figure III. 2:** Schéma bloc de la commande logique floue sur SPV.

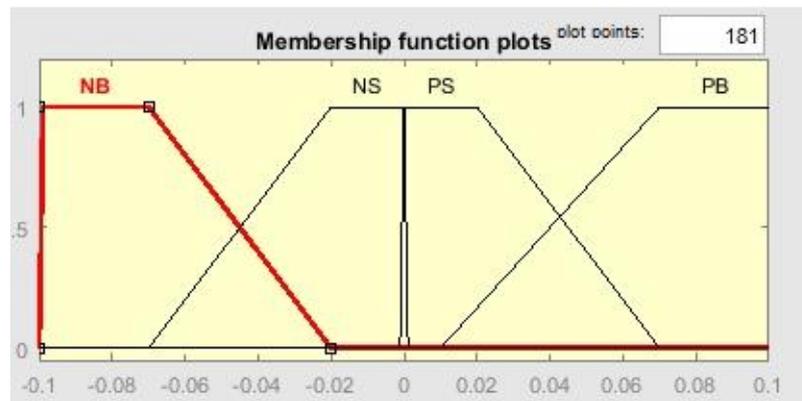
Nous avons considéré trois cas de fonctions d'appartenance en entrée du système. Le 1<sup>er</sup> cas comporte quatre fonctions d'appartenance en entrée, le 2<sup>ème</sup> cas présente cinq fonctions d'appartenance en entrée du système et enfin le 3<sup>ème</sup> cas comporte sept fonctions d'appartenance en entrée.

- **1<sup>er</sup> cas : Quatre fonctions d'appartenance en entrée**

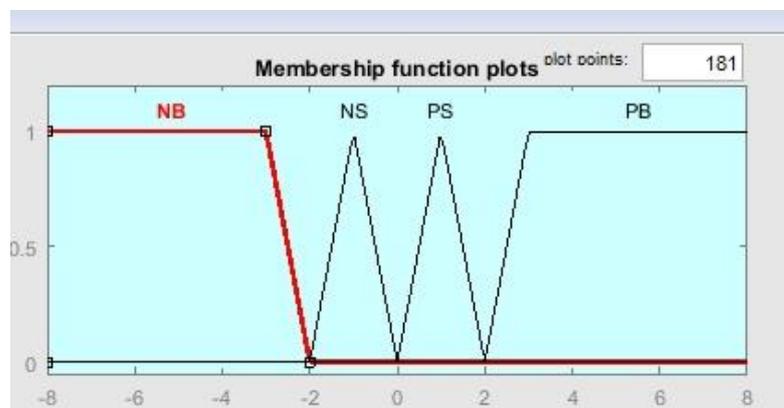
La Figure III.3(a) (b) (c) est illustrent les entrées  $\Delta p$  et  $\Delta I$  et la sortie  $\Delta D$  respectivement



(a)



(b)



(c)

**Figure III. 3:** Les fonctions d'appartenance (a)  $\Delta p$  (b)  $\Delta I$  et (c) La sortie  $\Delta D$ .

La table d'inférence avec quatre fonctions d'appartenance est donnée comme suit :

$\Delta I$ \ $\Delta P$	PB	PS	NB	PS
PB	<b>PB</b>	<b>PS</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>
PS	<b>PB</b>	<b>PS</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>
NB	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>PB</b>	<b>PS</b>
PB	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>PB</b>	<b>PS</b>

**Tableau III. 3:** Table à quatre fonctions d'appartenance.

La figure III.4 présente la puissance aux bornes du GPV avec commande à base de LF pour 4 fonctions d'appartenance en entrée

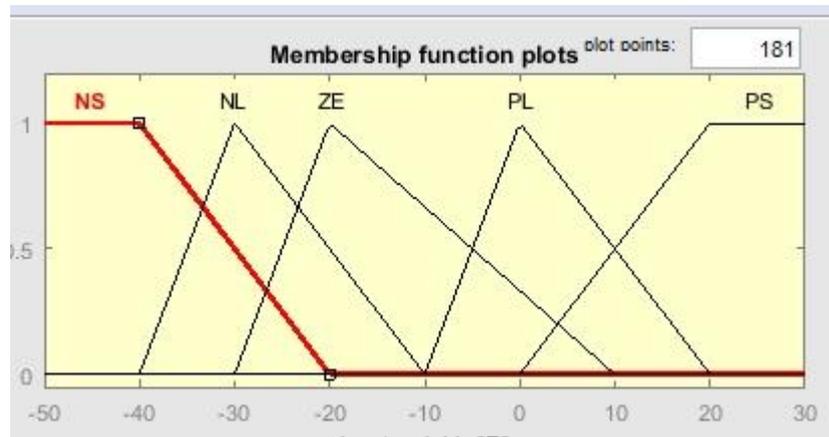


**Figure III. 4:** Puissance aux bornes du GPV avec commande à base de LF avec 4 fonctions d'appartenance en entrée.

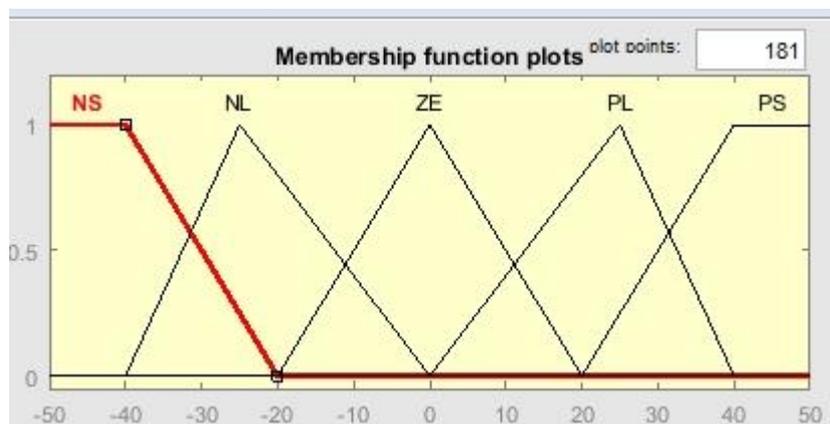
Il est important de préciser que ce premier cas a été réalisé avec des entrées E et  $\Delta E$  où les résultats de simulation n'étaient pas satisfaisants.

- 2eme cas : cinq fonctions d'appartenance

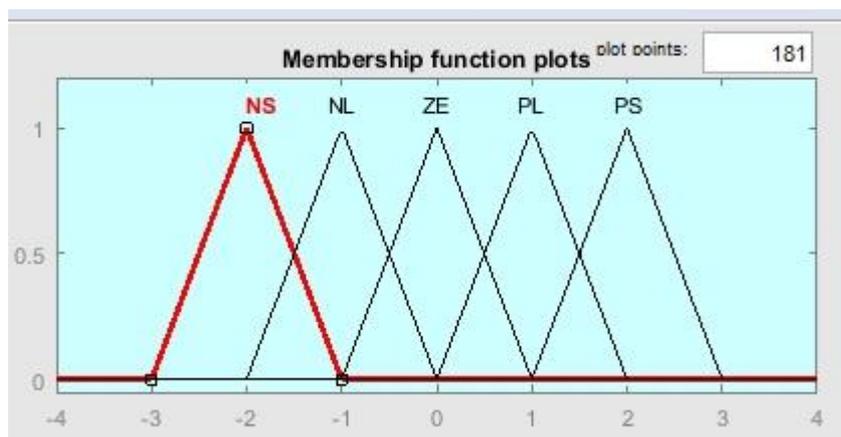
Les Figures III.5 (a) (b) (c) illustrent les entrées E et  $\Delta E$  et la sortie D respectivement



(a)



(b)



(c)

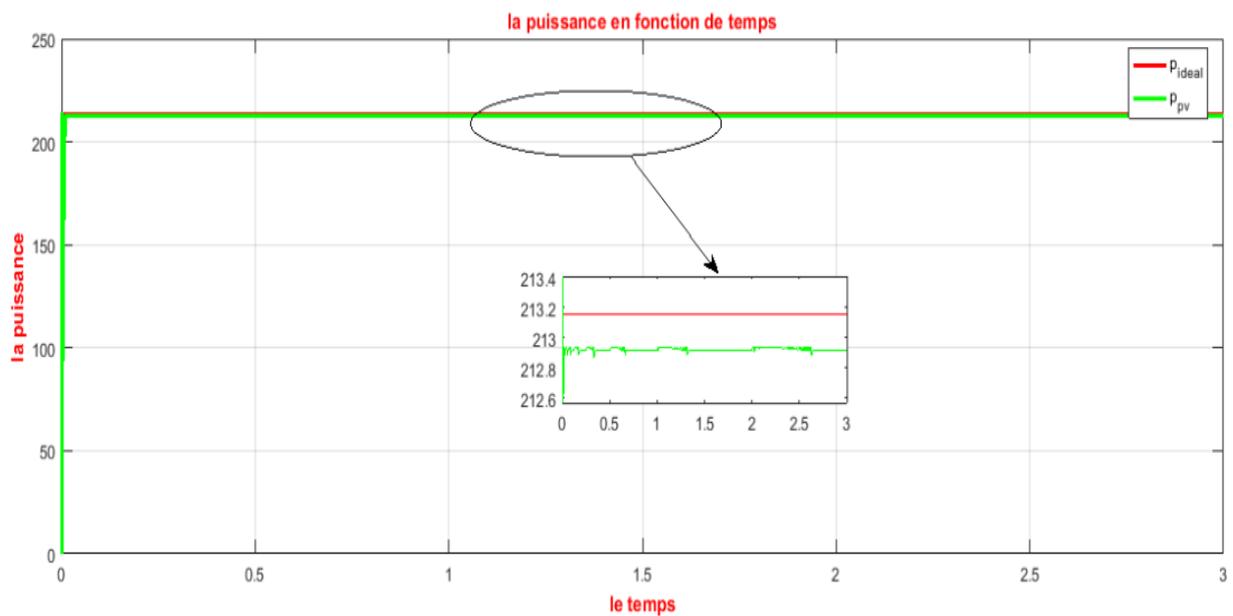
**Figure III. 5:** Les fonctions d'appartenance (a) E (b)  $\Delta E$  et (c) La sortie D.

La Table d'inférence avec cinq fonctions d'appartenance est donnée comme suit :

$E$	$\Delta E$				
	$NS$	$NL$	$ZE$	$PL$	$PS$
$NS$	$PS$	$PS$	$PL$	$PS$	$PS$
$NL$	$PS$	$PL$	$PL$	$PL$	$PS$
$ZE$	$NL$	$NL$	$ZE$	$PL$	$PL$
$PL$	$NS$	$NL$	$NL$	$NL$	$NS$
$PS$	$NS$	$NS$	$NL$	$NS$	$NS$

**Tableau III. 4:** Table à cinq fonctions d'appartenance.

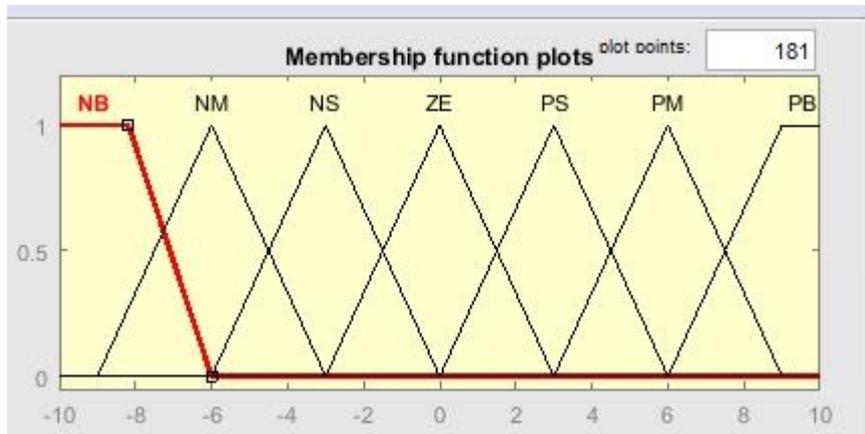
La figure III.6 présente la puissance aux bornes du GPV avec commande à base de LF pour 5 fonctions d'appartenance en entrée



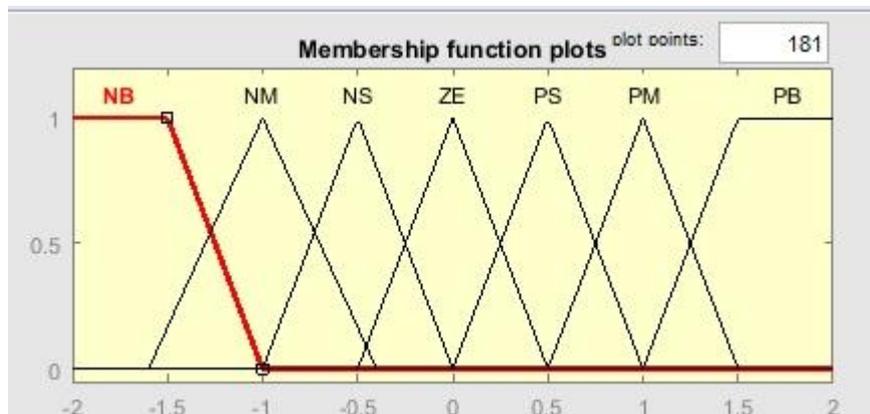
**Figure III. 6:** Puissance aux bornes du GPV avec commande à base de LF avec 5 fonctions d'appartenance en entrée.

- 3eme cas : sept fonctions d'appartenance

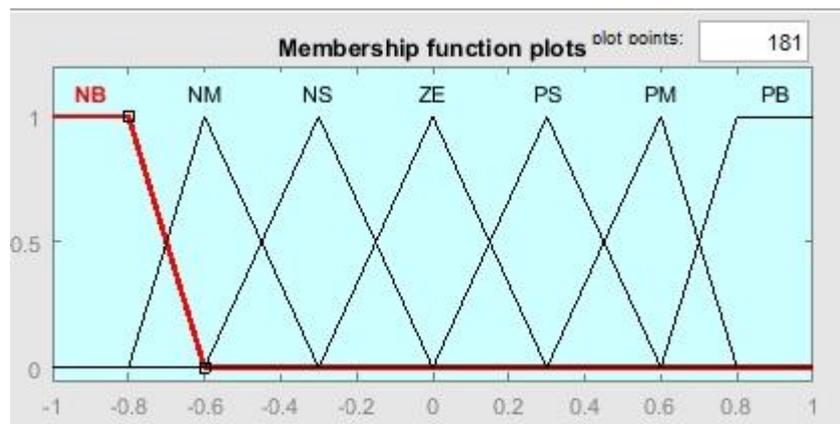
Les Figures III.7 (a) (b) (c) illustrent les entrées  $E$  et  $\Delta E$  et la sortie  $D$  respectivement



(a)



(b)



(c)

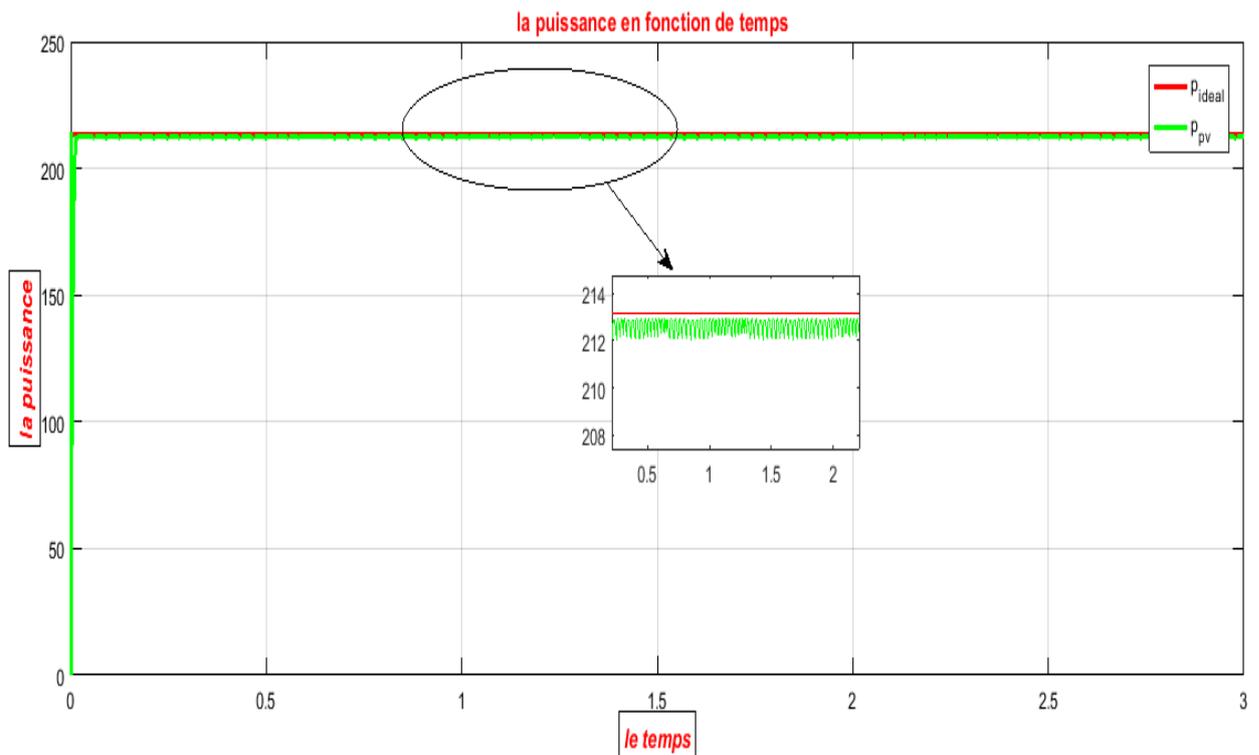
**Figure III. 7:** Les fonctions d'appartenance (a) E (b) CE et (c) La sortie D.

La Table d'inférence avec sept fonctions d'appartenance est donnée comme suit:

$e/\Delta e$	<b>NB</b>	<b>NM</b>	<b>NS</b>	<b>ZE</b>	<b>PS</b>	<b>PM</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	PB	PB	PB	PB	NM	ZE	ZE
<b>NM</b>	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	ZE
<b>NS</b>	PB	PB	PS	PS	PS	ZE	ZE
<b>ZE</b>	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
<b>PS</b>	ZE	ZE	ZE	NS	NS	NM	NB
<b>PM</b>	ZE	ZE	NS	NM	NB	NB	NB
<b>PB</b>	ZE	ZE	NM	NB	NB	NB	NB

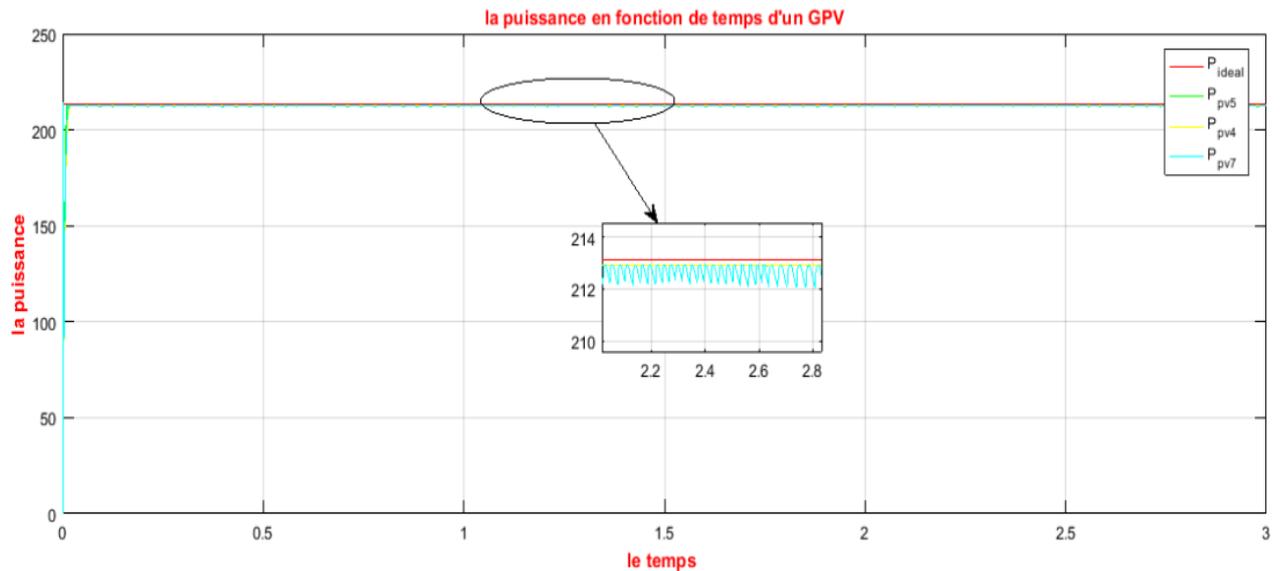
**Tableau III. 5:** Table à sept fonctions d'appartenance.

La figure suivant III.8 présente la puissance aux bornes du GPV avec la commande à base de LF pour 7 fonctions d'appartenance en entrée



**Figure III. 8:** Puissance aux bornes du GPV avec commande à base de LF avec 7 fonctions d'appartenance en entrée.

La figure III.9 indique et compare les différentes formes de courbes de puissance qui peuvent être obtenues pour un générateur photovoltaïque idéal. Cette comparaison peut aider à évaluer les performances et l'efficacité d'un générateur photovoltaïque réel par rapport à l'idéal.



**Figure III. 9:** Comparaison des différents Allures de puissance de d'entre et la puissance idéale de GPV dans les 3 cas.

Nombre des fonctions d'appartenance	Rendement	P-GPV	V-GPV	Amplitude des oscillations
04	0.9989	213.15	29	212.987
05	0.9989	213.15	29	212.911
07	0.9976	213.15	29	212.913

**Tableau III. 6:** Comparaison entre les différents rendements des fonctions d'appartenance.

### III.5 Interprétation du résultat

En comparant les rendements des différentes fonctions d'appartenance, Les résultats apparaissent dans le tableau suivant :

<b>Nombre des fonctions d'appartenance</b>	<b>Rendement</b>
<b>04</b>	0.9989
<b>05</b>	0.9989
<b>07</b>	0.9976

**Tableau III. 7:** Les rendements des différentes fonctions d'appartenance.

En comparant les rendements des différents cas de fonctions d'appartenance en entrée, nous pouvons observer les résultats suivants : la fonction d'appartenance 04 et la fonction d'appartenance 05 affichent des rendements identiques de 0.9989(99.89%), tandis que la fonction d'appartenance 07 présente un rendement légèrement inférieur de 0.9976 (99.76%). Ces chiffres indiquent que les fonctions d'appartenance 04 et 05 sont plus performantes que la fonction d'appartenance 07 en termes de conversion de l'énergie solaire en puissance électrique, dans le contexte du générateur photovoltaïque.

De plus, il est important de prendre en compte d'autres critères lors du choix de la fonction d'appartenance appropriée. Dans ce cas, nous optons pour la fonction d'appartenance 04 en raison de sa simplicité par rapport à la fonction d'appartenance 05, qui est plus complexe. Cette simplicité peut faciliter la compréhension et la gestion du générateur photovoltaïque, ce qui en fait un choix préférable dans ce contexte spécifique.

Il est donc recommandé d'utiliser la fonction d'appartenance d'inférence 04 en raison de son rendement élevé et de sa simplicité, offrant ainsi une solution efficace et pratique pour la conversion de l'énergie solaire en puissance électrique.

### **III.6 Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a introduit la logique floue comme une approche prometteuse pour le développement d'une commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques. La logique floue permet de prendre en compte les conditions variables et imprécises des environnements, offrant ainsi une commande robuste qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système.

La logique floue offre une approche prometteuse pour résoudre le problème complexe de la recherche du point de puissance maximale dans les systèmes

photovoltaïques. Ce chapitre a présenté le concept de la logique floue et son utilisation dans le développement d'une commande MPPT basée sur la logique floue.

La logique floue permet de modéliser et de traiter des informations incertaines et imprécises, ce qui la rend adaptée aux conditions variables et imprécises des environnements dans les systèmes photovoltaïques. Contrairement aux méthodes de commande conventionnelles, la logique floue ne nécessite pas la connaissance précise des modèles mathématiques du système, mais se base plutôt sur des règles linguistiques définies par un opérateur qualifié.

Ce chapitre a également abordé les différentes étapes de la commande floue, notamment la fuzzification, l'inférence et la défuzzification. La fuzzification permet de convertir les variables réelles en variables floues, l'inférence établit des relations logiques entre les entrées et les sorties, et la défuzzification convertit les ensembles flous de sortie en valeurs numériques compréhensibles.

L'utilisation de la logique floue dans le contrôle présente de nombreux avantages, notamment sa capacité à traiter l'incertitude, l'imprécision et les variations des conditions environnementales. Elle trouve des applications dans divers domaines tels que les produits grand public et l'industrie, y compris les systèmes photovoltaïques.

# Conclusion générale

---

L'objectif de ce travail est d'étudier l'application de la logique floue dans le contexte de la commande du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques. De plus, il vise à explorer la commande floue efficace pour maximiser la conversion de l'énergie solaire en puissance électrique en considérant quatre, cinq et sept fonctions d'appartenance dans la phase de fuzzification.

Tout d'abord, un aperçu général sur les énergies renouvelables et ses concepts de bases sont présentés. Nous avons aussi décrit le système PV ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

L'étape qui a suivi, a été consacrée à la mise en œuvre des techniques liées à l'étage d'adaptation et à la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) dans les systèmes photovoltaïques. Deux types de connexions entre le générateur photovoltaïque et la charge ont été présentés : la connexion directe et la connexion indirecte via un hacheur. D'autre part, différents types de hacheurs ont été mentionnés, tels que le hacheur abaisseur (BUCK), le hacheur élévateur (BOOST) et le hacheur abaisseur-élévateur (BUCK-BOOST). Parmi eux, le hacheur BOOST a été privilégié pour la simulation de la commande MPPT en raison de sa simplicité et de son rendement.

Ensuite, nous sommes passés à l'utilisation de la logique floue dans le contexte du suivi du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque (GPV). Cette approche offre une alternative prometteuse pour maximiser l'efficacité des systèmes.

Les résultats obtenus à partir des différentes tables d'inférence ont montré la grande capacité de la logique floue à estimer la puissance aux bornes du GPV. Cependant, il est important de noter que ces résultats peuvent varier en termes de proximité par rapport à la puissance idéale attendue.

A l'issue du travail effectué, les points suivants peuvent être établis :

- ✓ Nous pouvons dire, à partir des résultats satisfaisants que nous avons obtenu, que la technique LF est un outil de commande performant.
- ✓ L'irradiation solaire varie au cours de la journée d'une manière Gaussienne. Elle est faible au voisinage du lever et du coucher du soleil ce qui correspond à une hauteur du soleil nulle et atteint le maximum au milieu de la journée, c'est-à-dire à midi solaire quand la hauteur du soleil est maximale.
- ✓ L'utilisation de ce mécanisme de poursuite solaire permet, d'après les résultats obtenus, de récupérer une partie supplémentaire d'énergie par rapport aux systèmes fixes, inclinés.

A cet égard, nous pouvons suggérer quelques perspectives pour améliorer et développer davantage la commande à base de LF. Pour cela, il serait intéressant de considérer les éléments suivants :

- ✓ Intégration avec l'apprentissage automatique : L'intégration de la logique floue avec les techniques d'apprentissage automatique peut permettre d'améliorer les performances et la précision des systèmes. En combinant les capacités d'apprentissage des réseaux de neurones avec la modélisation de l'incertitude offerte par la logique floue, de nouvelles approches hybrides peuvent être développées.
- ✓ Méthodes d'optimisation avancées : Les techniques d'optimisation avancées peuvent continuer à être développées et adaptées pour optimiser les valeurs linguistiques et les paramètres des systèmes de logique floue. L'utilisation d'algorithmes évolutifs, d'algorithmes de recherche locale et d'autres méthodes d'optimisation peut permettre de trouver des solutions plus efficaces et précises.

## Références Bibliographiques

---

1. A. Labouret-Michel Villos, "Energie solaire photovoltaïque", édition Dunod, Paris, 2006.
2. Agence Internationale de l'Energie (AIE), l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des principales sources d'énergie renouvelable 2022 .
3. <http://www.bonhomme-gildas.fr/>
4. KessamAbderahim, Commande Prédicative De L'association D'une Source Photovoltaïque Connecte Au Réseau Electrique Et D'un Filtre Actif Parallèle, mémoire master, Universite Larbi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi, **2018**.
5. DhiaDddineZegtouf, Surveillance Et Détection De Défauts D'un Système Photovoltaïque Connecté Au Réseau Electrique, Université du Québec à Trois-Rivières, **2020**.
6. Belkaid Abdelhakim, Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome, thèse doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif 1, **2015**.
7. A. Djerdir, K. El Kadri, A. Miraoui, « Maquette pédagogique associant un générateur photovoltaïque et des supercondensateurs dans une application transport », rapport L2ES Belfort Cedex- France, **2002**.
8. Khemissimondher. Système Photovoltaïque Connectée au Réseau Via un Filtre Actif. Mémoire Master. Badji Mokhtar-Annaba, **2021**.
9. BUYERS. A ; « Les systèmes photovoltaïques » ; Guide de l'acheteur ; Canada 2003.
10. <https://www.connaissancedesenergies.org/>

11. Mida, Dris. Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride Eolien-Photovoltaïque. Diss. Université Mohamed Khider- Biskra, 2019.
12. Aoufrayene. Système Photovoltaïque Connectée au Réseau avec un élément de stockage. Mémoire Master. Badji Mokhtar-Annaba, **2022**.
13. H. FATIHA et R. AICHA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Thèse master académique en Electrotechnique Université kasdimerbahouargla 2014 :
14. C. CABAL, « Optimisation Energétique de l'Etage d'Adaptation Electronique Dédie à la Conversion Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2008
15. CHERKI Mohamed Souheil, Etude et comparaison des algorithmes MPPT dans les systèmes photovoltaïques, Mémoire, ecolenqtionql polytechnique alger,2013.
16. B. Subudhi, and R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems,". IEEE. Transustainable Energy, vol. 4, no. 1, pp. 1949-3029, 2013.
17. TARGANT Lyes : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique MEMOIRE DE MASTER UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2018
18. Angel Cid Pastor. Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques. Thèse Doctorat INSA de Toulouse, **2006**.
19. Benabda Amina, Contribution à l'Etude d'une Alimentation à Base de Panneaux Photovoltaïques avec Stockage, Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba, **2018**.
20. Daniel Hart « power electronics » McGraw-Hill.
21. K. Sundareswaran, V. Vigneshkumar and S. Palani. "Application of acombined particle swarm optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systemsunder partial shading conditions", Renewable Energy 75 (2015) 308-317.

22. S. Issaadi, « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
23. Behir Boubaker, Optimisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT floue, mémoire master, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, **2019**.
24. Alili Amel, Commande D'un Systeme Photovoltaïque En Utilisant Un Controleur Floue, Mémoire Master, Université Mouhamed Boudiaf - M'sila, **2019**
25. A. Messai, A. Mellit, A. Guessoum, S.A. Kalogirou 'Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation' Solar Energy 85(2011) pp: 265-277.
26. A. Mechernene, M. Zerikat, M. Hachelef, " Fuzzy speed regulation for induction motor associated with field oriented control ", International Journal on Sciences and Automatic Control & Computer engineering IJ-STA, Vol. 2, N°1, November **2008**.