



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



**Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : Electronique**

## **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par :**

**Mohamed Cheikh Cherif Mohamed Cheikh**

**Saied Chihab Eddine**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE : Automatique**

**OPTION : Automatique et informatique industrielle**

### **Thème**

***Extraction de la puissance maximale d'un système  
photovoltaïque sous variation des conditions climatiques***

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Hamdi Abdelwahab	MCB	Président
Silaa Mohammed Yousri	MCA	Examinateur
Rougab Ilyas	MCA	Encadrant

**Promotion :2024/2025**

## *Remerciement*

*Avant tout, nous remercions*

*Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, patience et force  
durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu  
être réalisé.*

*Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre  
encadreur : Mr. ILYES ROUGAB pour la confiance qu'il nous a  
prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de nous  
encourager et de nous pousser vers les horizons de recherche  
scientifique.*

*Nos remerciements au département d'électronique de l'université de  
Laghouat et à tous les enseignants qui nous enseignés durant les  
années du cursus.*

*Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury qui  
ont accepté de juger ce travail.*

*Enfin nous remercions aussi nos familles et les personnes qui nous  
ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.*

## *Dédicace*

Je dédie ce mémoire de fin d'études :

À mes chers parents Ali Saied et Kheira Ben Seghir, pour leur amour,

Leur patience et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours universitaire.

À mes frères et sœurs, pour leur encouragement constant.

À Monsieur le Professeur Rougab Ilyes,

Pour sa disponibilité, ses conseils précieux, et son accompagnement tout au long de ce travail.

Je lui exprime toute ma reconnaissance et mon profond respect.

À mes enseignants et encadrants, pour les connaissances transmises et l'encadrement de qualité.

À mes amis, pour leur soutien moral et leur présence sincère.

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin, trouvez ici l'expression de ma gratitude.

*Chihab Eddine*

## *Dédicace*

Je dédie ce mémoire de fin d'études :

À ma très chère maman, Hawa Mbeiyarek,

pour son amour, son soutien indéfectible et ses encouragements constants tout au long de mon parcours universitaire

À mon père, Cherif,  
pour sa présence.

À toutes mes cousines,  
pour leur soutien et leurs encouragements.

À Monsieur le Professeur Rougab Ilyes,  
pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son accompagnement tout au long de ce travail.  
Je lui exprime toute ma reconnaissance et mon profond respect.

À l'ensemble de mes enseignants et encadrants,  
pour la qualité de leurs enseignements et leur encadrement.

À mes amies de toujours,  
pour leur soutien moral et leur présence sincère.

À toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin,  
trouvez ici l'expression de ma gratitude.

*Mohamed Cheikh (Cherif)*

## الملخص

يتناول هذا البحث تقييم ثلاث تقنيات لتتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) في الأنظمة الكهروضوئية، وهي طريقة الاضطراب والملاحظة (P&O)، والتحكم بالمنطق الضبابي (FLC)، والتحسين بواسطة سرب الجسيمات (PSO)، تحت ظروف جوية متغيرة. ورغم انتشار الطرق التقليدية، إلا أنها تُظهر حدودًا في مواجهة التغيرات السريعة في الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة وكذلك في زمن الاستجابة.

أظهرت نتائج المحاكاة أن طريقة PSO تحقق أفضل أداء إجمالي. فخلال الانتقالات السريعة في الإشعاع الشمسي عند  $t$  0.3 ثانية، 0.6 ثانية، 0.9 ثانية (استجابات بدقة لكنها أبطأ قليلاً من P&O و FLC وفي الحالة المستقرة) ابتداءً من  $t$  0.7 ثانية (حافظت PSO على قدرة ثابتة مع اهتزازات شبه معدومة، على عكس P&O و FLC اللتين يفيتان أقل استقرارًا).

وبالتالي فإن التحسين بواسطة سرب الجسيمات يمثل نهجًا فعالًا لتعظيم الطاقة المستخرجة من الأنظمة الكهروضوئية تحت ظروف جوية متنوعة.

## **Résumé**

*Ce mémoire évalue trois techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour systèmes photovoltaïques — Perturbation & Observation (P&O), logique floue (FLC) et optimisation par essaim de particules (PSO) — sous conditions atmosphériques variables. Les méthodes classiques, bien que répandues, présentent des limites face aux variations rapides d'éclairement et de température ainsi qu'en termes de temps de réponse.*

*Les résultats de simulation montrent que la méthode PSO offre les meilleures performances globales. Lors de transitions rapides d'ensoleillement ( $t = 0,3 \text{ s} ; 0,6 \text{ s} ; 0,9 \text{ s}$ ), elle réagit avec précision, bien que légèrement plus lentement que P&O et FLC. En régime permanent ( $t \geq 0,7 \text{ s}$ ), PSO maintient une puissance stable avec des oscillations quasi nulles, contrairement à P&O et FLC qui restent plus instables.*

*Ainsi, l'optimisation par essaim de particules apparaît comme une approche performante pour maximiser l'énergie extraite des systèmes photovoltaïques soumis à diverses conditions météorologiques.*

## ***Abstract***

*This thesis evaluates three maximum power point tracking (MPPT) techniques for photovoltaic systems — Perturb and Observe (P&O), Fuzzy Logic Control (FLC), and Particle Swarm Optimization (PSO) — under varying atmospheric conditions. Conventional methods, although widely used, show limitations in coping with rapid changes in irradiance and temperature as well as in response time.*

*Simulation results show that PSO delivers the best overall performance. During rapid irradiance transitions ( $t = 0.3$  s,  $0.6$  s, and  $0.9$  s), it responds accurately though slightly slower than P&O and FLC. In steady state ( $t \geq 0.7$  s), PSO maintains a stable power output with almost no oscillations, unlike P&O and FLC which remain more unstable.*

*Therefore, Particle Swarm Optimization emerges as an effective approach to maximize the energy extracted from photovoltaic systems under diverse weather conditions.*

## *Liste d'abréviations*

E : Eclairage

$I_{PH}$  : Le photo-courant (A)

I : Le courant

$I_{RS}$  : Le courant de saturation inverse de la diode

q : la charge d'électrons

R : la résistance série ( $\Omega$ )

$R_{sh}$  : La résistances shunt ( $\Omega$ )

D : Rapport cyclique

MPPT : Maximum power point tracking

GPV : générateur photovoltaïque

DC-DC : Conversion continu-continu

P&O : perturb and observe

FLC : contrôleurs de la logique floue

PSO : Optimisation par essaim de particules

## Liste des figures

Figure I.1: Répartition de la production d'électricité mondiale .....	5
Figure I.2: Schéma d'un système photovoltaïque .....	7
Figure I.3: Schéma d'un chauffe-eau solaire .....	8
Figure I.4: Schéma de principe d'un réseau de chaleur géothermique .....	10
Figure I.5: Répartition spectrale du rayonnement .....	12
Figure I.6: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	14
Figure I.7: Caractéristiques électriques d'un panneau PV .....	15
Figure I.8: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (1) Courant-tension ; (2) Puissance-tension .....	17
Figure I.9: Composants d'un GPV .....	18
Figure I.10: Protection du panneau PV par diode 'by-pass' .....	18
Figure I.11: Protection du panneau PV par diode 'anti-retour' .....	19
Figure I.12: Panneau solaire autonome .....	20
Figure I.13: Système d'énergie hybride .....	20
Figure I.14: Systèmes couplés au réseau .....	21
Figure II.1: Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour .....	24
Figure II.2: Schéma de principe d'un hacheur .....	26
Figure II.3: Convertisseur élévateur (Boost) .....	26
Figure II.4: Le schéma fonctionnel de base d'un système PV .....	27
Figure II.5: Schéma de principe du convertisseur MPPT .....	28
Figure II.6: Schéma bloc de l'algorithme tension du circuit ouvert FCO .....	30
Figure II.7: Schéma bloc de l'algorithme FCC .....	31
Figure II.8: Schéma bloc de l'algorithme P&O .....	32
Figure II.9: Schéma bloc de l'algorithme de la conductance incrémentale INC .....	34
Figure II.10: Structure principale d'un contrôleur logique flou .....	35
Figure II.11: Organigramme de l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO) .....	37
Figure III.1: Modèle du système PV sous Simulink .....	41
Figure III.2 : Profile de l'éclairement solaire .....	42
Figure III.3 : Courbes de tension pour différentes commandes MPPT sous éclairement variable et température (25 °C) .....	43
Figure III.4 : Courbes de courant pour différentes commandes MPPT sous éclairement variable et température (25 °C) .....	43
Figure III.5 : Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous éclairement variable et température (25 °C) .....	44

## Liste des tableaux

Tableau II.1 : Base de règles de logique floue.....	35
Tableau III.1 : Caractéristiques du panneau PV AREI-230W-M6-G.....	42
Tableau III.2 : Comparaison entre les techniques MPPT.....	44

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction : .....	4
I.2 Production d'électricité dans le monde : .....	4
I.3 Stockage de l'énergie électrique : .....	5
I.3.1 Les batteries électrochimiques .....	5
I.4 Les principales sources d'Energie .....	5
I.4.1 Energies non renouvelables.....	6
I.4.2 Energies renouvelables .....	6
I.5 Avantages et inconvénients des Energie renouvelables : .....	10
I.5.1 Les avantages des Energies renouvelables : .....	10
I.5.2 Les inconvénients des énergies renouvelable : .....	11
I.6 Principe de la conversion photovoltaïque : .....	11
I.7 Rayonnement solaire.....	11
I.8 Les panneaux solaires .....	12
I.9 L'effet photovoltaïque .....	13
I.10 La cellule photovoltaïque .....	13
I.11 Modélisation d'une cellule photovoltaïque : .....	13
I.12 Caractéristiques électriques et paramètres d'une cellule PV .....	15
I.13 Grandeurs caractéristiques : .....	16
I.14 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques électriques :....	16
I.14.1 Influence de l'éclairement solaire .....	16
I.15 Générateur photovoltaïque GPV .....	17
I.16 Protection des panneaux PV.....	18
I.16.1 Protection par diode 'by-pass' (en parallèle).....	18
I.16.2 Protection par diode 'anti-retour' (en série) .....	19
I.17 Les différents types des systèmes photovoltaïques .....	19
I.17.1 Systèmes autonomes .....	19
I.17.2 Systèmes hybrides.....	20
I.17.3 Systèmes couplés au réseau.....	21
I.18 Groupement de cellules photovoltaïques .....	22
I.19 Conclusion.....	22

## **Chapitre II : Convertisseurs DC/DC et commandes MPPT ..... 23**

II.1	Introduction .....	24
II.2	Connexion directe entre la source et la charge.....	24
II.3	Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge .....	25
II.4	Convertisseurs DC/DC.....	25
II.5	Convertisseur élévateur (boost).....	26
II.6	Suivi des points maximum (MPPT) .....	27
II.7	Le principe de fonctionnement du MPPT .....	27
II.8	Classification des commandes MPPT.....	28
II.8.1	MPPT indirecte.....	29
II.8.2	MPPT directe.....	29
II.9	Algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) .....	29
II.9.1	Méthode de la tension du circuit ouvert (FCO).....	29
II.9.2	Méthode du courant de court-circuit (FCC) .....	30
II.9.3	Méthode de la perturbation et observation (P&O).....	31
II.9.4	Méthode de la conductance incrémentale (INC) .....	32
II.9.5	Algorithme basé sur la logique floue .....	34
II.9.6	Optimisation par essaim de particules (PSO).....	36
II.10	Conclusion.....	38

## **Chapitre III : Simulation et discussion des résultats..... 39**

III.1	Introduction .....	40
III.2	L'outil Matlab/Simulink .....	40
III.3	Simulation du système photovoltaïque .....	40
III.4	Simulation du system photovoltaïque sous les 3 commandes .....	41
III.4.1	Résultats obtenus et discussion.....	41
III.5	Conclusion.....	45

## **Conclusion générale :.....51**

# **Introduction générale**

L'énergie est aujourd'hui un défi majeur pour l'humanité. Face à la baisse progressive des réserves mondiales de pétrole, de gaz et de charbon, et à la forte demande énergétique, notre planète est de plus en plus menacée par la pollution. Pour ces raisons, tous les pays cherchent des solutions alternatives. Les énergies renouvelables apparaissent alors comme une réponse prometteuse, car elles sont propres, durables et respectueuses de l'environnement.

Actuellement, la part des énergies renouvelables représente environ 32 % de la production mondiale d'électricité en 2024, en nette augmentation par rapport à 30 % en 2023. Les sources fossiles constituent encore environ 56 % (dont environ 34 % proviennent du charbon et 22 % du gaz naturel), tandis que l'énergie nucléaire contribue à hauteur d'environ 9 % de la production électrique mondiale. [1]

Comme leur nom l'indique, les énergies renouvelables utilisent des éléments naturels qui se renouvellent rapidement. Parmi elles, on trouve l'énergie éolienne, hydraulique, géothermique et solaire. L'énergie solaire photovoltaïque, découverte par E. Becquerel en 1839, permet de transformer directement la lumière du soleil en électricité.

L'énergie photovoltaïque est une source propre, flexible et fiable. Depuis plus de 40 ans, elle est utilisée dans le domaine spatial (satellites), puis pour alimenter les balises en mer ou encore pour fournir de l'électricité à des zones isolées grâce à des batteries. Cependant, plusieurs facteurs comme la température, la poussière ou l'éclairement (intensité de la lumière) ont un impact direct sur le fonctionnement et le rendement des panneaux solaires. En particulier, la variation de l'éclairement influence fortement les performances des cellules photovoltaïques.

En effet, sur toute l'énergie solaire reçue, une petite partie est réfléchi, une autre transformée en électricité, mais la majorité est perdue sous forme de chaleur. Cette perte diminue le rendement global du système. Pour améliorer cela, il est nécessaire d'utiliser un algorithme appelé MPPT (suivi du point de puissance maximale), qui permet d'extraire en continu la puissance optimale du panneau.

Ce mémoire s'intéresse justement à l'effet de la variation de l'éclairement solaire sur le rendement d'un système photovoltaïque, en utilisant différents algorithmes MPPT. Plusieurs méthodes ont été développées et améliorées dans la littérature, et notre objectif est d'en comparer quelques-unes.

Le mémoire est organisé comme suit :

- Le premier chapitre présente les Généralités sur les systèmes photovoltaïques : la production mondiale de l'énergie renouvelable, leurs types, avantages, inconvénients et la du fonctionnement de la cellule solaire jusqu'au générateur, avec les modèles électriques et mathématiques, ainsi que l'impact de la température et de l'éclairement.
- Le deuxième chapitre : parlons un peu du convertisseurs DC/DC et décrit les techniques de commande MPPT étudiées (Perturbe and Observe, logique floue, Optimisation par essaim de particules (PSO), et leur utilisation avec des convertisseurs DC/DC.
- Le troisième chapitre présente : les simulations de ces différentes commandes et une analyse des résultats obtenus.
- Cette étude se conclut par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus et propose quelques perspectives pour de futurs travaux.

# **Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques**

## **I.1 Introduction :**

L'énergie photovoltaïque (souvent appelée "cellules solaires" ou "panneaux solaires") est un système de production d'électricité qui convertit le rayonnement solaire du soleil (c'est-à-dire, l'énergie lumineuse du soleil) en électricité à courant continu (CC). Un système photovoltaïque solaire typique comportera des panneaux solaires qui absorbent cette lumière du soleil et la transforment en électricité, fournissant ainsi une énergie propre et renouvelable, même lorsque le soleil ne brille pas intensément.

Depuis le début du siècle, l'énergie photovoltaïque a été reconnue comme une source d'énergie renouvelable prometteuse, et tous types de développements (scientifiques, technologiques, industriels et logistiques) ont augmenté, avec une production doublant environ tous les deux ans. Cela en fait l'une des technologies d'énergie renouvelable à la croissance la plus rapide au monde.

Avec l'augmentation des incitations gouvernementales pour les propriétaires de systèmes photovoltaïques (par exemple, des réductions fiscales, des paiements pour l'énergie fournie au réseau et des tarifs de rachat), cette tendance devrait se poursuivre. [2]

## **I.2 Production d'électricité dans le monde :**

La production mondiale s'élève à 8 582 millions de tonnes en 2022, selon l'AIE. Depuis 1900, la production de charbon a augmenté de manière significative, passant de 5 349,89 TWh à 48 490,00 TWh en 2022, soit une multiplication par environ 9. La croissance a été particulièrement rapide au milieu du 20e siècle et au début du 21e siècle, avec des augmentations notables entre 1960 et 1970, ainsi qu'entre 2000 et 2010. La production a atteint un pic en 2022 avec 48 490,00 TWh. Malgré des fluctuations mineures entre 2012 et 2020, la tendance générale reste à la hausse, marquée par des périodes de stabilité relative et une reprise récente. [3]

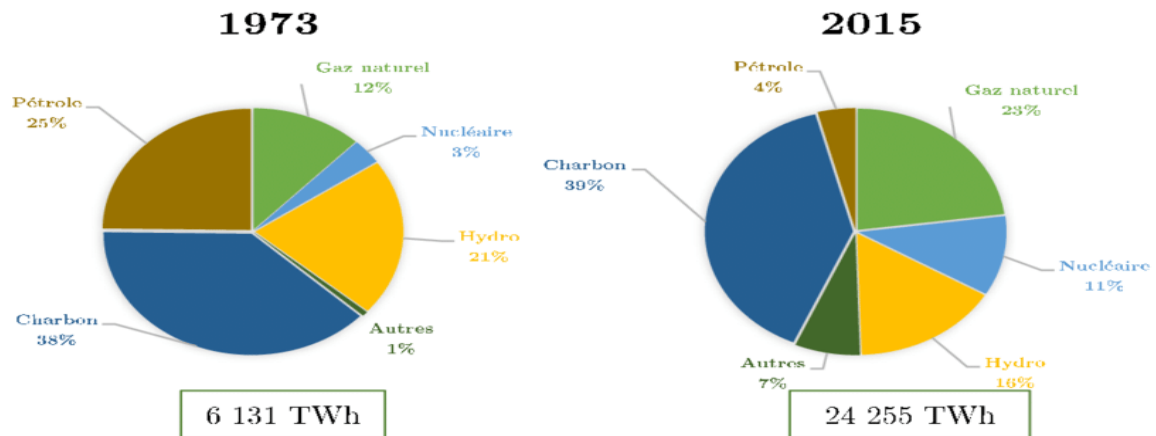


Figure I.1: Répartition de la production d'électricité mondiale

### I.3 Stockage de l'énergie électrique :

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie produite pour une utilisation ultérieure.

L'idée est d'assurer l'équilibre entre la production et la consommation de l'énergie, de réduire les pertes et ainsi d'optimiser les coûts. [4]

#### I.3.1 Les batteries électrochimiques

Un accumulateur électrochimique est un dispositif qui stocke de manière réversible l'énergie électrique sous forme chimique (phase dite de charge) pour la restituer ensuite sous forme électrique (phase dite de décharge). Ce cycle charge/décharge réversible distingue fondamentalement un accumulateur d'une pile, qui est irréversible et non rechargeable.

Une batterie est l'association de plusieurs accumulateurs dans le but d'atteindre une certaine tension (association en série) ou intensité (association en parallèle) de l'électricité restituée par le système. En français, le terme « batterie » peut prêter à confusion, car il peut désigner soit un accumulateur (ou cellule) individuel, soit une batterie dans son sens strict, c'est-à-dire l'association de plusieurs cellules. Par exemple, la « batterie » d'un téléphone portable est constituée d'un seul accumulateur de 3,7 volts (V), tandis que celle d'un véhicule électrique correspond à l'association de plusieurs accumulateurs pour atteindre 400 V. [5]

### I.4 Les principales sources d'Énergie

Les sources d'énergie primaires prennent différentes formes, notamment l'énergie nucléaire, l'énergie fossile - comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel - et les sources renouvelables comme le vent, le solaire, la géothermie et l'hydroélectricité. Ces sources

primaires sont converties en électricité, une source d'énergie secondaire, qui circule à travers les lignes électriques et les autres infrastructures de transmission vers votre domicile et vos entreprises. [6]

### **I.4.1 Energies non renouvelables**

L'énergie non renouvelable est générée par la combustion de matières fossiles comme le gaz naturel, le mazout et le charbon. L'énergie nucléaire est également considérée comme une forme non renouvelable d'énergie [7]

#### ***I.4.1.1 Energies fossiles***

On appelle énergie fossile l'énergie produite par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. Ces combustibles, riches en carbone et en hydrogène, sont issus de la transformation de matières organiques enfouies dans le sol pendant des millions d'années (d'où le terme "fossiles"). Ce sont des énergies non renouvelables puisqu'une fois utilisées, elles ne peuvent être reconstituées qu'à l'échelle des temps géologiques.

On appelle hydrocarbures des composés chimiques dont les molécules sont constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ce sont les principaux constituants du pétrole brut et du gaz naturel, ainsi que des produits pétroliers issus des raffineries. [8]

#### ***I.4.1.2 Energies nucléaires***

L'énergie nucléaire est une forme d'énergie libérée par le noyau, cœur des atomes, composé de protons et de neutrons. Elle peut être produite de deux manières, par la fission - division du noyau de l'atome en plusieurs parties - ou par la fusion de plusieurs noyaux.

L'énergie nucléaire utilisée aujourd'hui dans le monde pour produire de l'électricité provient de la fission nucléaire, la technologie de production d'électricité au moyen de la fusion étant toujours en phase de recherche-développement. Le présent article porte sur la fission nucléaire. [9]

### **I.4.2 Energies renouvelables**

Les énergies renouvelables sont des énergies provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation. La lumière du soleil et le vent, par exemple, constituent de telles sources qui se renouvellent constamment. Les sources d'énergie renouvelables sont abondantes et sont présentes partout autour de nous. [10]

### 1.4.2.1 Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100 % verte car sa production n'émet que peu de CO<sub>2</sub>.

Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité ou en chaleur. Les panneaux solaires qui captent cette énergie peuvent être installés sur différentes structures : des ombrières solaires, des hangars photovoltaïques industriels ou agricoles, au sol, etc. [11]

### 1.4.2.2 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium (« Silicon » en anglais). Lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière, des électrons sont éjectés de ces matériaux et ils circulent dans un circuit fermé, produisant alors de l'électricité. [12]

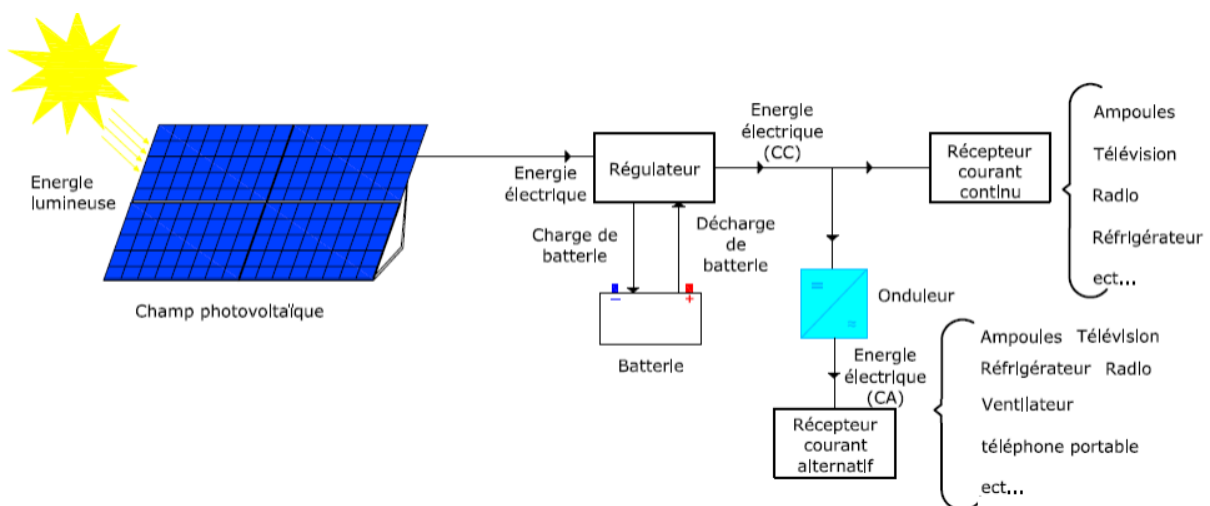


Figure I.2 : Schéma d'un système photovoltaïque

### I.4.2.3 Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires ;
- En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, dessalement, etc.

De fait, elle est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. On utilise pour cela des capteurs thermiques. Il en existe plusieurs catégories mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz (dit « caloporteur ») qui la transporte vers un réservoir de stockage de chaleur.

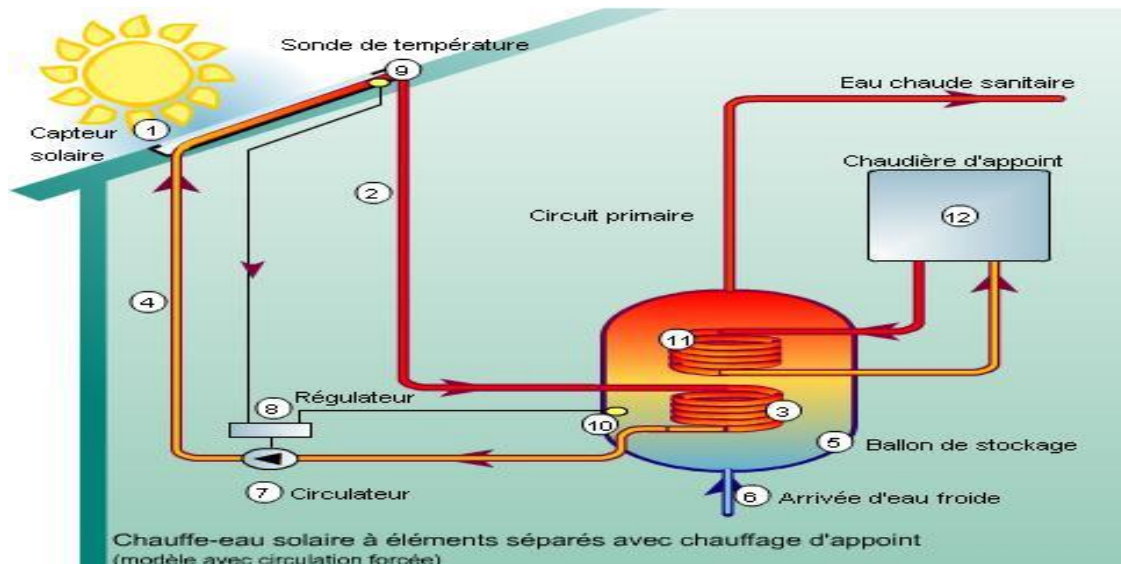


Figure I.3 : Schéma d'un chauffe-eau solaire

### I.4.2.4 Energie éolienne

L'énergie éolienne utilise la force du vent pour générer de l'électricité à travers des éoliennes. Cette forme d'énergie renouvelable est l'une des plus dynamiques et en croissance rapide, contribuant à la diversification du mix énergétique mondial. Il existe des éoliennes terrestres et en mer. L'énergie éolienne fonctionne en convertissant l'énergie cinétique du vent en électricité. L'énergie éolienne utilise la force du vent pour générer de l'électricité à travers des éoliennes. Cette forme d'énergie renouvelable est l'une des plus dynamiques et en croissance rapide, contribuant à la diversification du mix énergétique mondial. Il existe des

éoliennes terrestres et en mer. L'énergie éolienne fonctionne en convertissant l'énergie cinétique du vent en électricité. [13]

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Il faut donc d'abord que l'énergie mécanique des pales passe par un Multiplicateur qui a pour rôle d'accélérer le mouvement lent des pales.

#### ***1.4.2.5 Energie géothermique***

L'énergie géothermique est l'énergie thermique stockée sous la surface de la Terre. Elle peut être extraite comme source de chaleur et d'électricité renouvelables. L'énergie est extraite en forant des puits et en faisant circuler un fluide ou une saumure à travers un réservoir souterrain, puis en l'utilisant à la surface comme chaleur directe ou en l'utilisant pour produire de l'électricité. Les applications potentielles de l'énergie géothermique dépendent des températures des fluides et des débits accessibles, qui varient en fonction de la profondeur de la ressource et des caractéristiques de la roche (p. ex. porosité, perméabilité).

Il existe trois principaux types de centrales géothermiques :

- Les centrales à vapeur sèche utilisent la vapeur directement d'un réservoir géothermique pour faire tourner les turbines des générateurs. La première centrale géothermique a été construite en 1904 en Toscane, en Italie, où de la vapeur naturelle surgissait de la terre.
- Les centrales à vapeur à cycle flash prennent l'eau chaude à haute pression des profondeurs de la terre et la convertissent en vapeur pour entraîner les turbines des générateurs. Lorsque la vapeur refroidit, elle se condense en eau et est réinjectée dans le sol pour être réutilisée. La plupart des centrales géothermiques dans le monde sont des centrales à vapeur à cycle flash.
- Les centrales à cycle binaire transfèrent la chaleur de l'eau chaude géothermique à un autre fluide. La chaleur provoque la transformation du fluide secondaire en vapeur, qui est utilisée pour entraîner les turbines des générateurs. [14]

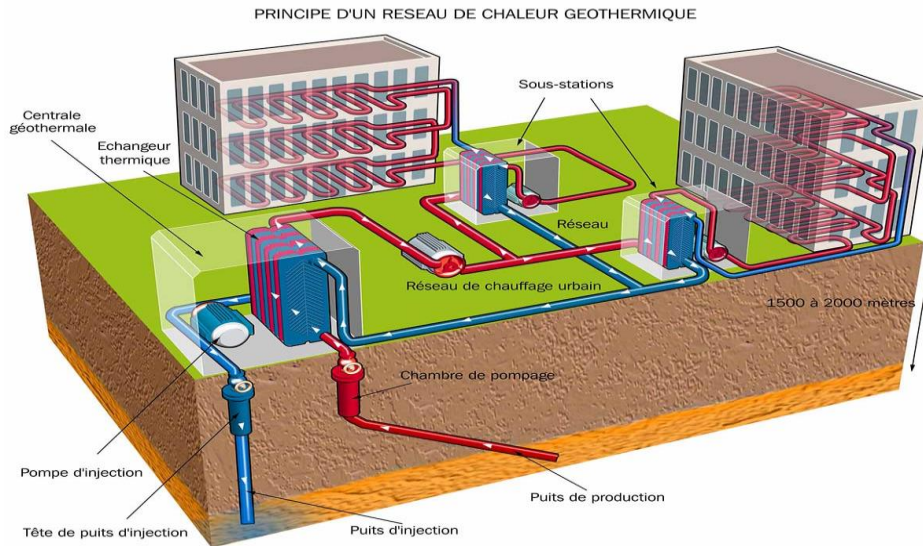


Figure I.4 : Schéma de principe d'un réseau de chaleur géothermique

#### ***1.4.2.6 Energie de la biomasse***

La biomasse est la matière vivante végétale et animale dont la combustion est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme. Elle remonte à la découverte du feu à la préhistoire. Elle permet de fabriquer de l'électricité, dans des centrales biomasse, grâce à la chaleur dégagée par la combustion de matières organiques (bois, végétaux, déchets agricoles ou ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières. [15]

#### ***1.4.2.7 Energie hydraulique***

L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable qui exploite la force de l'eau pour produire de l'électricité. Elle est l'une des plus anciennes et des plus répandues dans le monde, contribuant de manière significative à la production d'énergie décarbonée. On distingue deux principales filières d'énergie hydraulique : la grande (centrale de grande et moyenne chute) et la petite hydraulique (usine au fil de l'eau). Les énergies marines (usines marémotrices, hydroliennes, houlomotrices) utilisent aussi la force motrice de l'eau pour produire de l'énergie. [16]

### **I.5 Avantages et inconvénients des Energie renouvelables :**

#### **I.5.1 Les avantages des Energies renouvelables :**

L'énergie renouvelable présente de nombreux avantages par rapport aux combustibles fossiles. Voici quelques-uns des principaux avantages de l'utilisation d'une source d'énergie alternative :

- L'énergie renouvelable ne s'épuisera pas.

- L'énergie renouvelable nécessite moins de maintenance.
- Les énergies renouvelables permettent de réaliser des économies.
- L'énergie renouvelable présente de nombreux avantages environnementaux.
- Les énergies renouvelables réduisent la dépendance aux sources d'énergie étrangères.
- L'énergie renouvelable contribue à la purification de l'eau et de l'air.
- L'énergie renouvelable crée des emplois.
- L'énergie renouvelable permet de réduire les déchets.

### **I.5.2 Les inconvénients des énergies renouvelable :**

- L'énergie renouvelable a des coûts initiaux élevés.
- L'énergie renouvelable est intermittente.
- Les énergies renouvelables ont des capacités de stockage.
- Les sources d'énergie renouvelable ont des limitations géographiques.
- Les énergies renouvelables ne sont pas toujours totalement exemptes de carbone. [17]

## **I.6 Principe de la conversion photovoltaïque :**

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteurs ; collecte des particules générées dans le dispositif. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semiconducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. [18]

## **I.7 Rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil.

Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie

extrêmement élevées. Une partie de ce rayonnement est filtrée par la couche d'ozone avant d'atteindre la troposphère. Via la photosynthèse, il est nécessaire à la plupart des espèces qui vivent sur la Terre. [19]

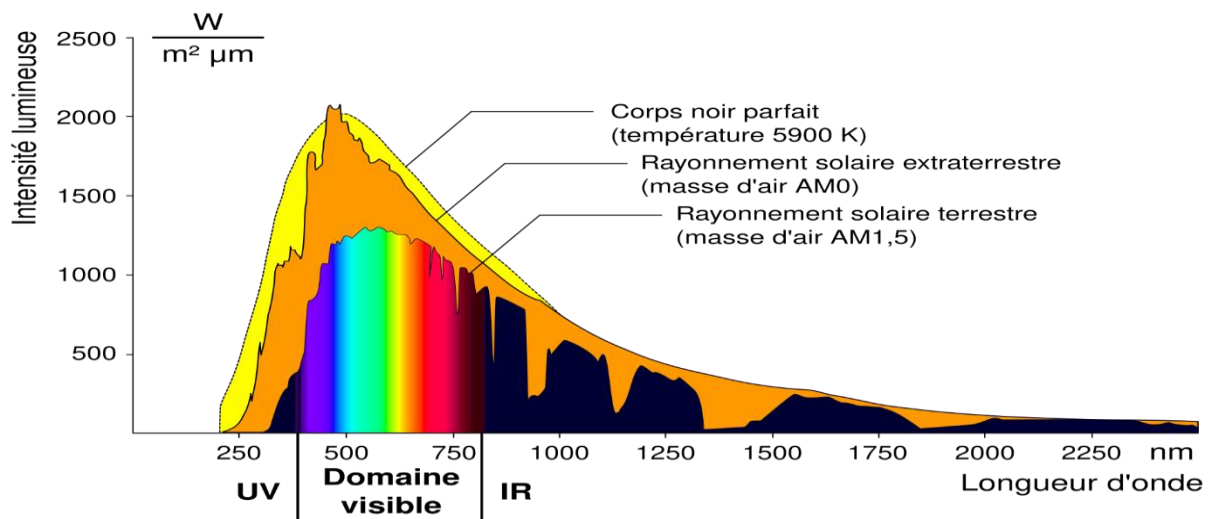


Figure I.5 : Répartition spectrale du rayonnement

## I.8 Les panneaux solaires

Les panneaux solaires sont conçus pour capturer l'énergie lumineuse du soleil et la convertir en électricité utilisable. Ils sont constitués de plusieurs cellules photovoltaïques en silicium. Ces cellules photovoltaïques sont généralement montées sur un support rigide et recouvertes d'un matériau protecteur transparent, tel que le verre, pour les protéger des intempéries.

Lorsque la lumière du soleil frappe les cellules photovoltaïques, les électrons contenus dans les cellules sont excités, créant ainsi un flux d'électricité. Ce courant électrique peut ensuite être utilisé pour alimenter des appareils électriques, charger des batteries, ou être injecté dans le réseau électrique, contribuant ainsi à la production d'une électricité d'origine renouvelable.

Les panneaux solaires sont utilisés pour produire de l'électricité dans diverses applications, allant des installations solaires résidentielles et commerciales aux centrales solaires de grande envergure. Ils jouent un rôle clé dans la transition vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de gaz à effet de serre. [20]

Parmi les avantages des panneaux solaires figurent l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable et propre, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la baisse des factures

d'électricité. Parmi les inconvénients, on peut citer la dépendance à la disponibilité et à l'intensité de la lumière solaire, la nécessité d'un entretien régulier, et un coût initial élevé. Les panneaux solaires sont largement utilisés à des fins résidentielles, commerciales et industrielles, ainsi que dans l'espace, souvent en combinaison avec des batteries.

## I.9 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie. [20]

## I.10 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium (« Silicon » en anglais). Lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière, des électrons sont éjectés de ces matériaux et ils circulent dans un circuit fermé, produisant alors de l'électricité.

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau. [21]

## I.11 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Le champ PV est constitué de modules connectés en série et en parallèle pour obtenir la puissance souhaitée. Chaque module est lui-même composé de cellules. Pour la modélisation du champ PV, nous partirons donc de l'élément de base qui est la cellule.

Il existe plusieurs modèles électriques de la cellule photovoltaïques :

On a le modèle à une diode, à deux diodes, et à trois diodes. Le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision : il apparaît très adapté à notre étude. Ce modèle est constitué de photo-courant, de diode, de résistance parallèle, et de résistance série comme l'indique la Figure I.7 :

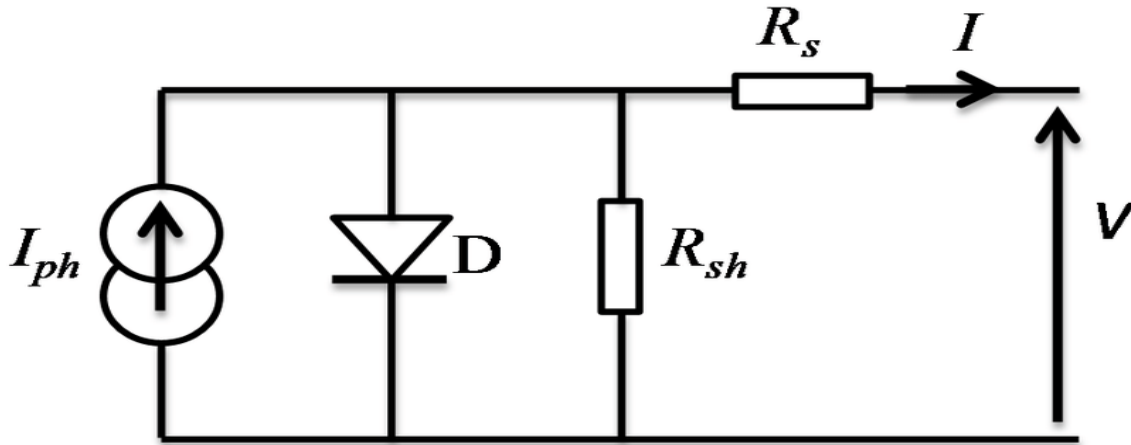


Figure I.6 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_0 * \left( \exp \left( \frac{V + R_s * I}{n * K * N_s * T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s * I}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

- La résistance série  $R_s$
- La résistance shunt  $R_{sh}$
- La photo courante  $I_{ph}$

$$I_{ph} = ( I_{\{sc\}} + k_i \cdot (T - 298) ) \cdot \frac{G}{1000} \quad (I.2)$$

- Le courant de saturation  $I_0$

$$I_0 = I_{RS} \cdot \left( \frac{T}{Tn} \right)^3 \exp \left[ \frac{q \cdot E_{g0} \left( \frac{1}{Tn} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot k} \right] \quad (I.3)$$

- Le courant de saturation inverse de la diode  $I_{RS}$  :

$$i_0 i_{RS} = \frac{i_{sc}}{e \left( \frac{q v_0 C}{n \cdot N_s \cdot k \cdot T} \right) - 1} \quad (I.4)$$

- Le facteur d'idéalité de la diode  $n$
- Le courant de la résistance shunt  $I_{RS}$  :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

## I.12 Caractéristiques électriques et paramètres d'une cellule PV

En utilisant l'équation implicite du courant délivré par la cellule photovoltaïque, on peut tracer ses caractéristiques électriques : courant-tension et puissance-tension. Les caractéristiques  $I=f(V)$  et  $p=f(V)$  sont représentées sur la figure suivante :

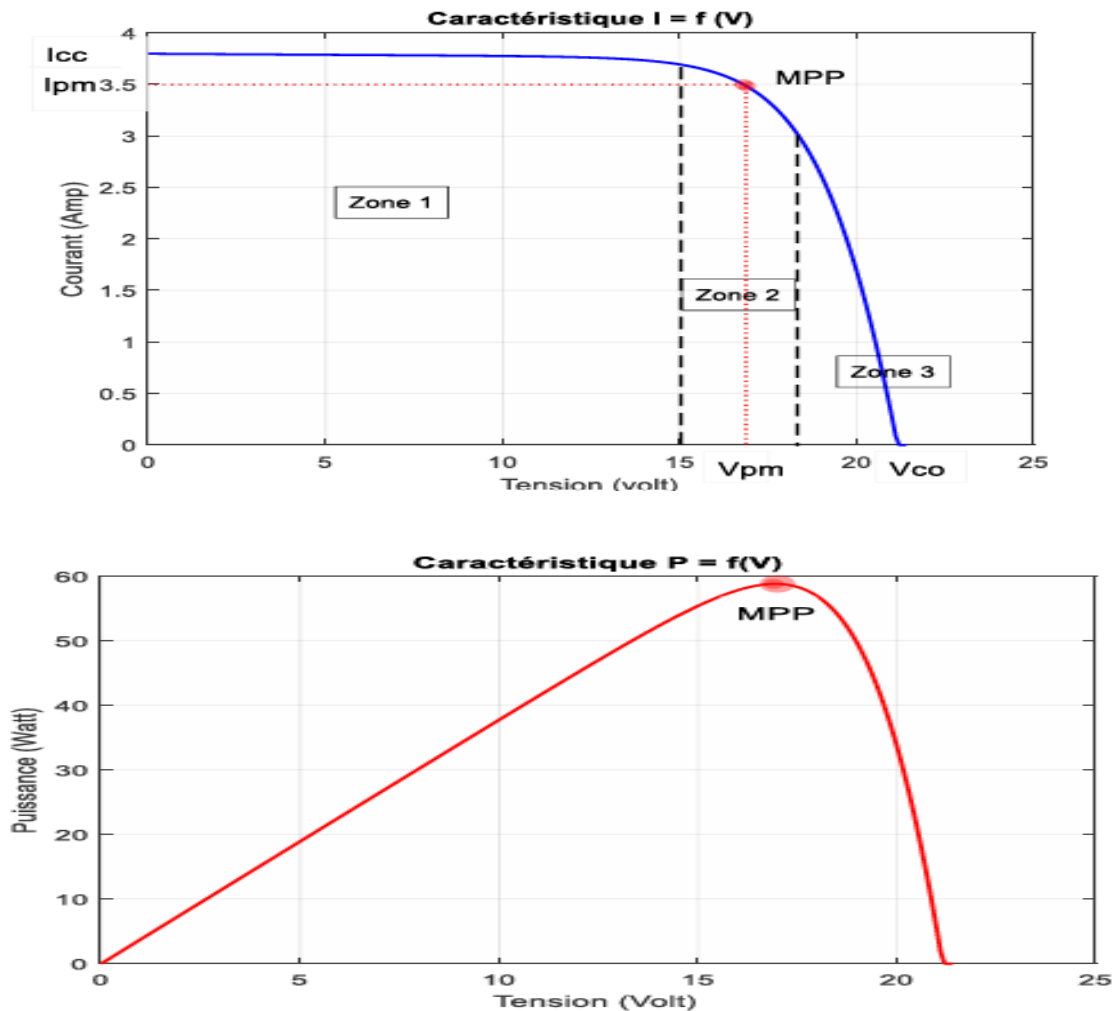


Figure I.7 : Caractéristiques électriques d'un panneau PV

Les caractéristiques intensité-tension et puissance-tension d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'irradiation solaire et de la température de fonctionnement des cellules.

- Fonctionnement comme générateur de courant : le point de fonctionnement appartient à la zone (1). Le courant est proche du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et la tension est faible.
- Fonctionnement comme générateur de tension : le point de fonctionnement appartient à la zone (3). La tension est proche de la tension à vide  $V_{co}$  et le courant est faible.

- Fonctionnement optimal : quand le point de fonctionnement appartient à la zone (2), l'utilisation est meilleure ; la puissance absorbée est maximisée.

### I.13 Grandeurs caractéristiques :

- Tension de circuit ouvert  $v_{co}$  (pour  $I_{co} = 0$ )

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

- Courant de court-circuit  $I_{CC}$  (pour  $v_{CC} = 0$ ): tension nulle correspondant au courant maximum. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule.
- La puissance maximale d'une cellule

Une cellule PV possède un point pour lequel sa puissance débitée est maximum. Ce point est tangent à une courbe d'iso puissance. On la nomme  $P_{max}$ .

- Facteur de forme

On appelle facteur de forme  $f$ , le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}$ , dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit  $I_{CC}$  par la tension de circuit ouvert  $v_{co}$  (la puissance maximale d'une cellule idéale.

$$f = \frac{P_{max}}{v_{co} \cdot I_{CC}}$$

### I.14 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques électriques :

#### I.14.1 Influence de l'éclairement solaire

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante présente la variation des caractéristiques d'un panneau PV à différents niveaux d'éclairement :

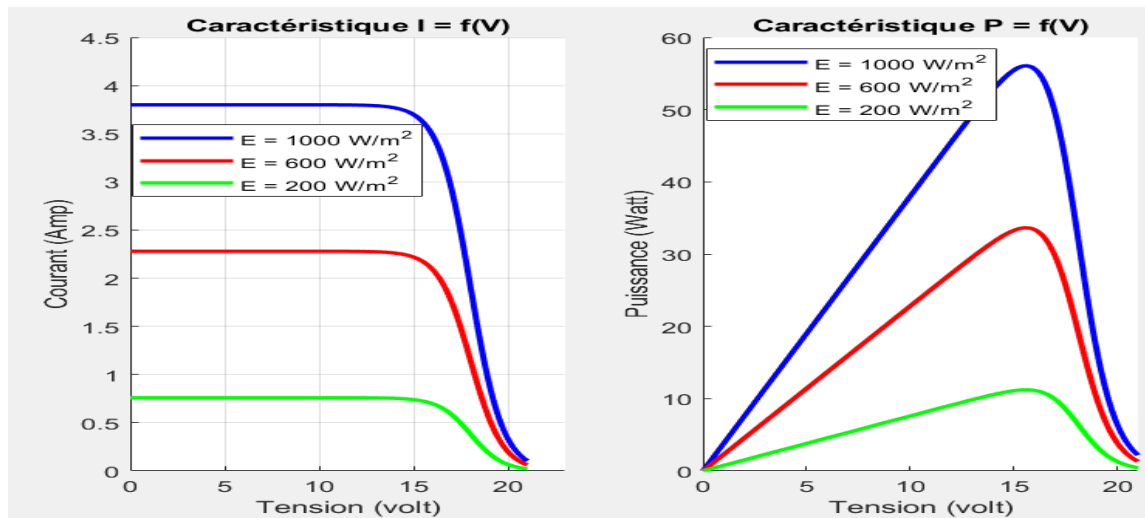


Figure I.8 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques d'un panneau PV : (1) Courant-tension ; (2) Puissance-tension

## I.15 Générateur photovoltaïque GPV

Un Générateur Photovoltaïque (GPV) désigne l'ensemble des modules photovoltaïques d'un système photovoltaïque, qui sont reliés entre eux pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Il constitue la partie productrice d'un système photovoltaïque. Chaque module est composé de cellules photovoltaïques qui exploitent l'effet photoélectrique, transformant ainsi l'énergie lumineuse (provenant du soleil) en courant continu (DC).

Le GPV est souvent constitué de plusieurs modules disposés en série et/ou en parallèle afin d'obtenir la tension et le courant requis pour l'application spécifique, comme l'alimentation d'une maison, d'une entreprise ou l'injection d'énergie dans le réseau. Le courant continu généré par le GPV est ensuite généralement converti en courant alternatif (AC) à l'aide d'un onduleur, afin qu'il soit compatible avec les systèmes électriques domestiques ou industriels.

Le GPV peut également inclure des composants supplémentaires comme des boîtes de jonction, des câblages électriques, et des structures de support pour maintenir les panneaux photovoltaïques en place. En somme, le générateur photovoltaïque est l'élément essentiel pour capter et convertir l'énergie solaire en électricité, dans un système photovoltaïque complet.

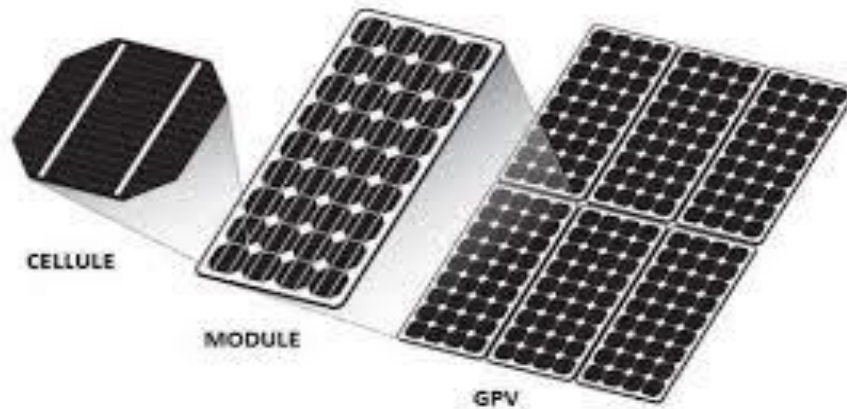


Figure I.9 : Composants d'un GPV

## I.16 Protection des panneaux PV

### I.16.1 Protection par diode 'by-pass' (en parallèle)

Lorsqu'une partie de module est accidentellement couverte, le courant produit par le reste du champs PV continuer à circuler à travers les cellules cachées, toute la tension du module peut chuter via ces diodes. Dans ce cas, ces dernières se comportent en récepteur et risquent l'échauffement et la destruction. Ce phénomène est dit 'hot spot' ou point chaud, pour éviter ce phénomène, on installe en parallèle sur les modules des diodes qui dérive le courant en cas d'obstruction de cellule. La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante.

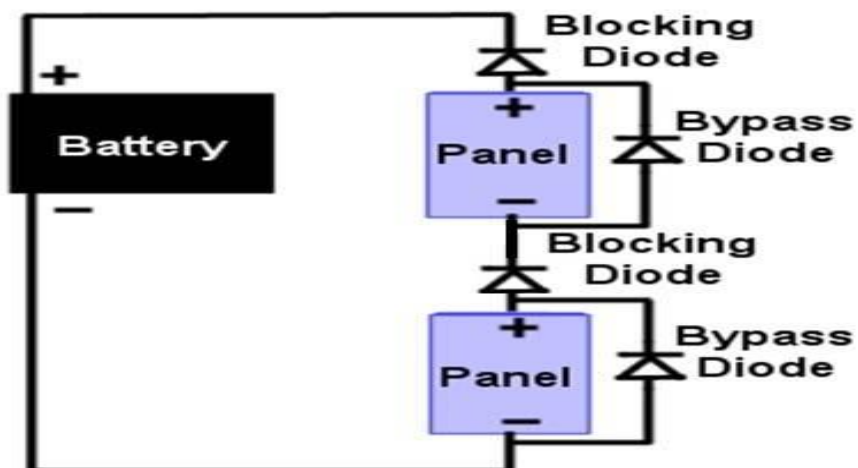


Figure I0.10 : Protection du panneau PV par diode 'by-pass'

### I.16.2 Protection par diode ‘anti-retour’ (en série)

Pour la protection des modules en cas d'endommagement, on branche en série des diodes anti-retour. Une cellule PV se comporte comme récepteur lorsqu'elle ne reçoit pas du rayonnement solaire (nuit, ciel nuageux, ...), elle consomme alors du courant comme une simple lampe, donc pour éviter la décharge de la batterie dans le module, on installe des diodes de blocage en série entre la batterie et le module.

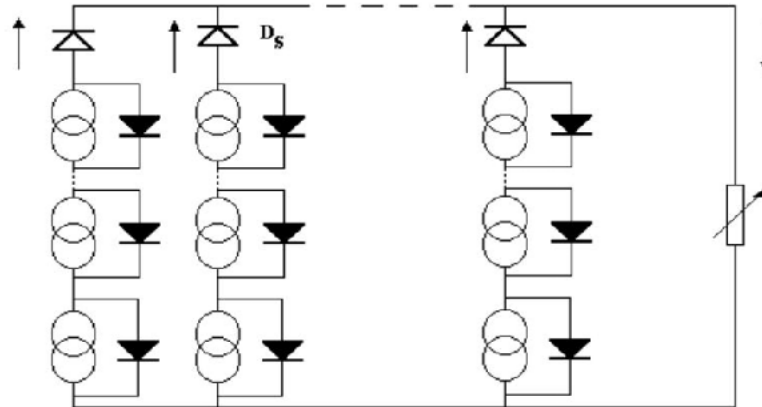


Figure I.11: Protection du panneau PV par diode ‘anti-retour’

## I.17 Les différents types des systèmes photovoltaïques

### I.17.1 Systèmes autonomes

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont caractéristiques des endroits isolés sans accès au réseau électrique. Dans les systèmes autonomes, l'énergie provenant des modules photovoltaïques et/ou d'une éolienne est stockée dans des batteries pour être ensuite utilisée par l'onduleur ou directement par d'éventuelles charges en courant continu. Un système électrique aussi complexe nécessite différents équipements pour fonctionner parfaitement quelles que soient les conditions opérationnelles. [22]

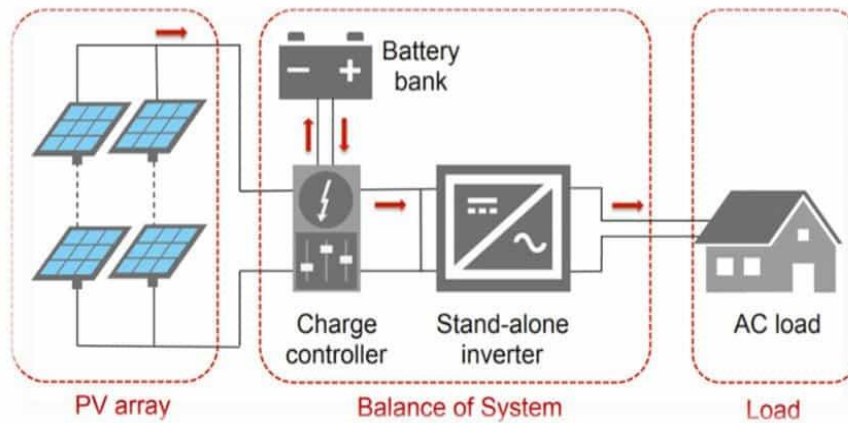


Figure I.12 : Panneau solaire autonome

### I.17.2 Systèmes hybrides

Les installations solaires hybrides sont des systèmes d'alimentation qui combinent l'énergie solaire d'un système photovoltaïque avec une autre source d'énergie. L'un des plus courants est le système hybride solaire-diesel, qui associe le photovoltaïque et les générateurs diesel, également appelés groupes électrogènes. Les générateurs diesel sont utilisés pour combler en permanence l'écart entre la charge et l'énergie générée par le système photovoltaïque. Des batteries de stockage peuvent être utilisées pour améliorer les performances globales du système et garantir que la quantité d'énergie répond à la demande. Un système de gestion de l'énergie peut également être intégré pour optimiser le système, étant donné que la capacité des groupes électrogènes diesel est limitée et que la production d'énergie solaire est intermittente. [23]

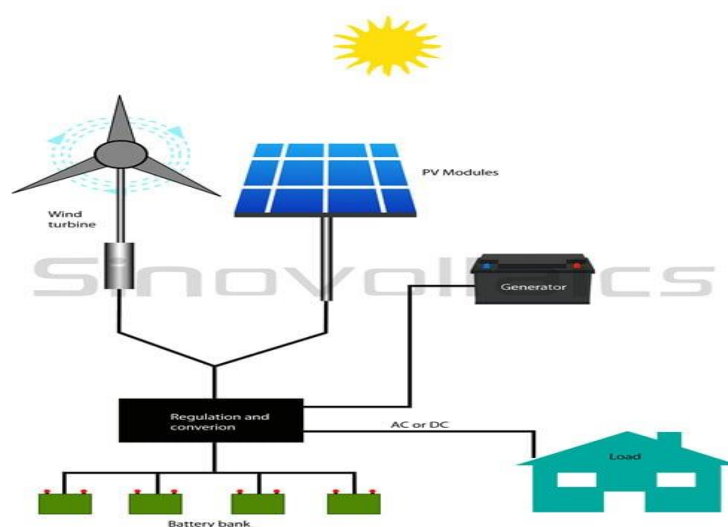


Figure I.13: Système d'énergie hybride

### I.17.3 Systèmes couplés au réseau

Le photovoltaïque raccordé au réseau est constitué de systèmes de production d'électricité photovoltaïque qui peuvent être centralisés (centrale solaire photovoltaïque) ou décentralisés (toits de maisons individuelles, de mairies, de granges, etc.).

On parle de photovoltaïque raccorder au réseau par opposition au photovoltaïque hors réseau qui peut être soit autonome, avec des batteries d'accumulateurs, soit hybride avec des batteries d'accumulateurs et une source d'énergie auxiliaire (groupe électrogène, éolienne, turbine hydraulique).

Ces systèmes sont constitués de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux (en série et en parallèle) et branchés sur un ou plusieurs onduleurs eux-mêmes connectés au réseau de distribution ou de transport d'électricité.

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau constituent la plus grande partie des installations photovoltaïques dans le monde : en 2018, la capacité photovoltaïque mondiale installée est estimée à  $464 \text{ GW}_c$ , en progression de  $100 \text{ GW}_c$  pour l'année 2018. Les installations au sol de forte puissance contribuent largement à ces chiffres.

Les modules photovoltaïques sont habituellement installés face au sud dans l'hémisphère nord, sur des toitures industrielles ou agricoles, sur des terres non valorisables... Ils peuvent également être « intégrés » à la structure d'un bâtiment neuf en façade, brise-soleil ou toiture.

[24]

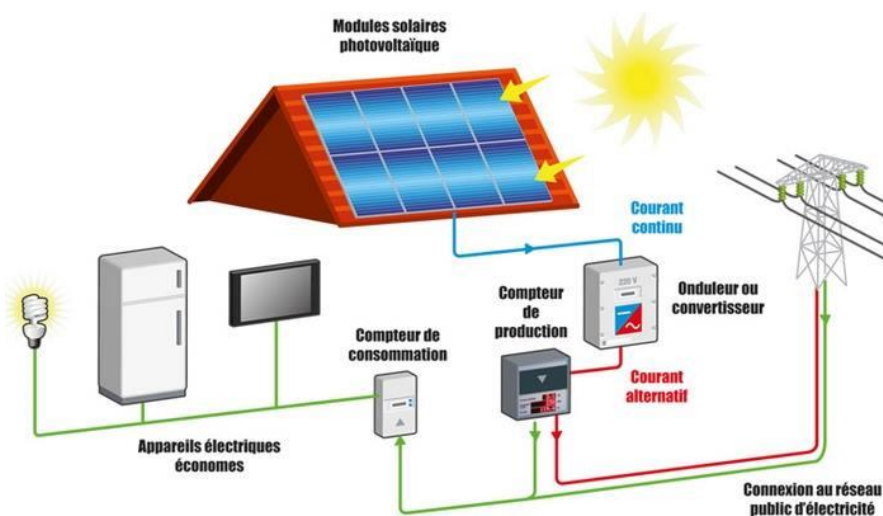


Figure I.014 : Systèmes couplés au réseau

## I.18 Groupement de cellules photovoltaïques

Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux. [25] constituant des branches elles-mêmes  $N_p$  en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par :

$$P_{pv} = N_s \cdot v_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

Avec :

- $P_{pv}$  : la puissance disponible en sortie du GPV.
- $v_{pv}$  : la tension a la sortie du GPV.
- $I_{pv}$  : le courant de sortie du GPV.

## I.19 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un aperçu général des énergies renouvelables, en mettant en évidence leurs avantages, leurs limites, ainsi que leur rôle croissant dans la production mondiale d'électricité. Nous nous sommes ensuite focalisés sur l'énergie solaire photovoltaïque, en détaillant le principe de conversion de l'énergie lumineuse en électricité, le fonctionnement des cellules photovoltaïques, ainsi que les différentes technologies disponibles sur le marché. Enfin, nous avons abordé la modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) et les grandeurs électriques caractéristiques qui le définissent. Ces éléments constituent les fondations nécessaires pour aborder, dans les chapitres suivants, les techniques d'adaptation et d'optimisation visant à maximiser l'extraction de la puissance dans des conditions réelles, notamment en présence d'ombrages partiels.

# **Chapitre II : Convertisseurs DC/DC et commandes MPPT**

## II.1 Introduction

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En réalité, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie. Dans ce chapitre on va étudier la modulation de différent type des convertisseurs (DC/DC), et la simulation d'un hacheur survolteur.

## II.2 Connexion directe entre la source et la charge

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très haut degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La figure II.1 montre ce cas de figure. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur PV et en plus l'endommager irréversiblement. Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. Cette configuration est illustrée à la figure II.1 L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de  $P_{max}$  disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.

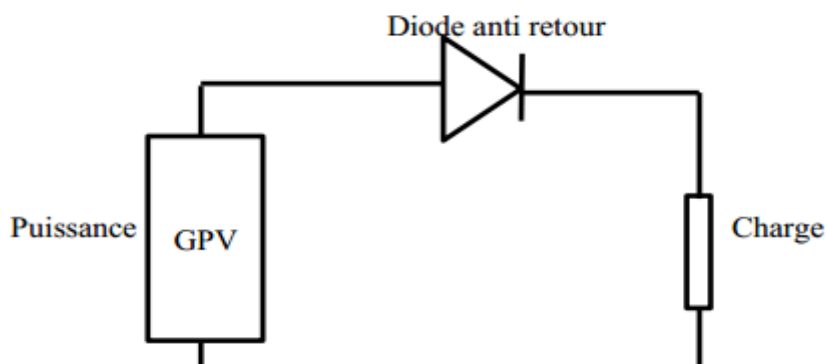


Figure II.1: Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour

### II.3 Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec un point de puissance maximum MPP. Ces caractéristiques dépendent entre autres du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme présenté dans la figure (II.3). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible. Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation [26]

### II.4 Convertisseurs DC/DC

Le convertisseur DC/DC est un dispositif électronique essentiel utilisé pour modifier un niveau de tension continue (DC) en un autre. Il joue un rôle crucial dans de nombreuses applications modernes, allant de l'alimentation des circuits électroniques embarqués dans les téléphones portables et ordinateurs portables, aux systèmes d'énergie renouvelable, en passant par les véhicules électriques. Contrairement aux transformateurs classiques qui fonctionnent uniquement avec des tensions alternatives (AC), les convertisseurs DC/DC permettent une régulation efficace de la tension continue, en assurant un rendement élevé et une compacité adaptée aux systèmes embarqués. Il en existe plusieurs types, dont les plus courants sont le Buck (abaisseur), le boost (élevateur) et le Buck-boost (abaisseur-élevateur), chacun répondant à des besoins spécifiques en matière de conversion énergétique.

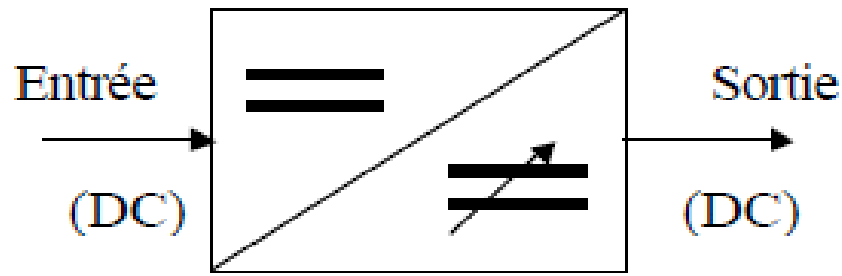


Figure II.2 : Schéma de principe d'un hacheur

Les convertisseurs utilisés dans les systèmes solaires pour générer les tensions et courants souhaités sont :

- **Le convertisseur Buck (abaisseur)** : il est utilisé quand on veut une tension de sortie plus faible que la tension d'entrée.
- **Le convertisseur Boost (élevateur)** : il est utilisé quand on veut une tension de sortie plus élevée que la tension d'entrée.
- **Le convertisseur Buck-Boost** : il peut augmenter ou diminuer la tension selon le besoin, en fonction du rapport cyclique ( $\alpha$ ).

## II.5 Convertisseur élevéteur (boost)

Un convertisseur Boost (ou Step-Up en anglais), ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

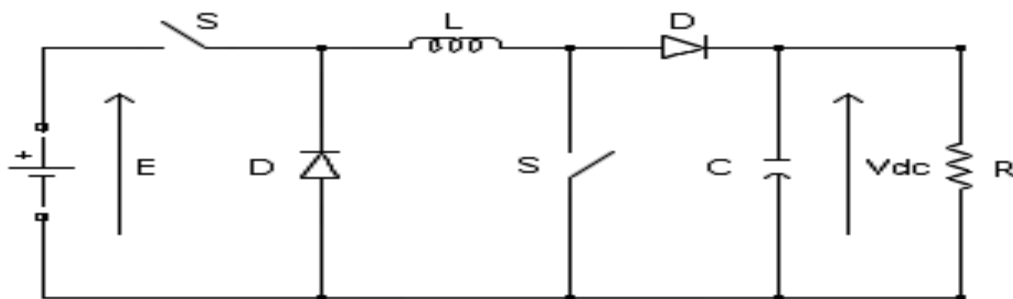


Figure II.3 : Convertisseur élevéteur (Boost)

$$V_o = \frac{V_i}{1-\alpha} \quad (\text{II.1})$$

$$I_o = I_i(1 - \alpha) \quad (\text{II.2})$$

## II.6 Suivi des points maximum (MPPT)

Le suivi du point de puissance maximale (*Maximum Power Point Tracking*, ou MPPT) est une technique utilisée dans les systèmes d'énergie solaire, en particulier dans les systèmes photovoltaïques (PV), pour optimiser la puissance de sortie des panneaux solaires. Les panneaux solaires ont une tension caractéristique à laquelle ils produisent une puissance de sortie maximale, appelée point de puissance maximale (MPP). Cependant, ce point peut varier en fonction de facteurs tels que la température, l'irradiance et l'ombrage.

Les systèmes MPPT utilisent des circuits électroniques ou des algorithmes pour surveiller en permanence la puissance des panneaux solaires et ajuster les conditions de fonctionnement afin de garantir que les panneaux fonctionnent à leur point de puissance maximale ou à proximité de celui-ci, quelles que soient les conditions environnementales changeantes. Cette optimisation implique généralement de faire varier les paramètres de fonctionnement électriques du système, tels que la tension ou le courant, pour maintenir une puissance de sortie maximale. [27]

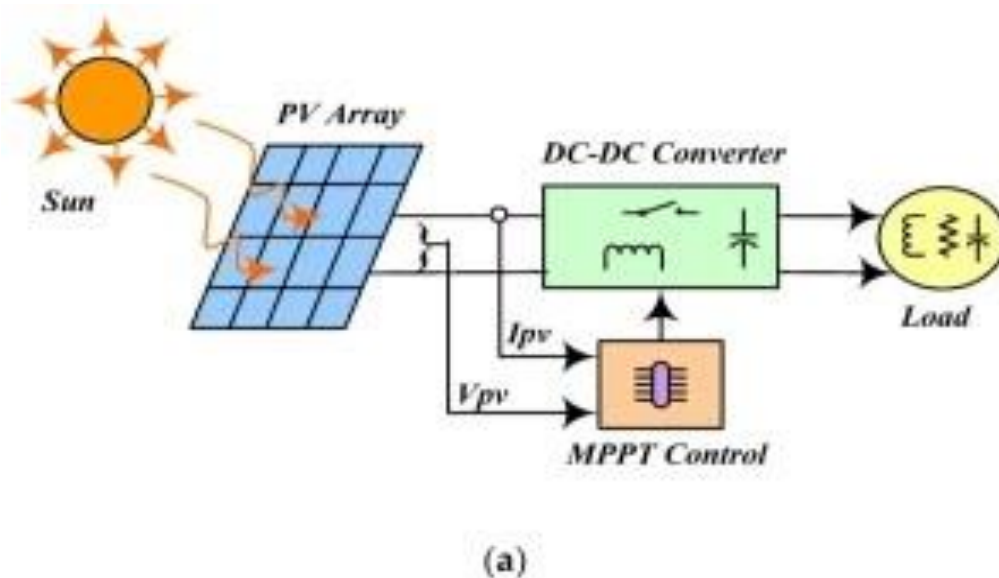


Figure III.4 : Le schéma fonctionnel de base d'un système PV

## II.7 Le principe de fonctionnement du MPPT

MPPT le contrôle est généralement complété par un circuit de conversion DC/DC. Le réseau de cellules photovoltaïques est connecté à la charge via un circuit DC/DC. Le dispositif de suivi de puissance maximale détecte en permanence les changements de courant et de

tension du générateur photovoltaïque et, en fonction de ces changements, le convertisseur DC/DC est ajusté. Le rapport cyclique du signal d'entraînement PWM est ajusté.

Pour les circuits linéaires, lorsque la résistance de charge est égale à la résistance interne de l'alimentation, l'alimentation a la puissance de sortie maximale. Bien que les cellules photovoltaïques et les circuits de conversion DC/DC soient fortement non linéaires, ils peuvent être considérés comme des circuits linéaires sur une très courte période. Par conséquent, tant que la résistance équivalente du circuit de conversion DC-DC est ajustée de sorte qu'elle soit toujours égale à la résistance interne de la cellule photovoltaïque, la sortie maximale de la cellule photovoltaïque peut être atteinte, et le MPPT de la cellule photovoltaïque peut être réalisé.

En général, le contrôleur MPPT suivra le point de puissance maximum dans le panneau solaire en temps réel pour maximiser l'efficacité du panneau solaire. Plus la tension est élevée, plus la puissance peut être produite grâce au suivi de la puissance maximale, améliorant ainsi l'efficacité de la charge. En ce sens, le contrôleur de charge et de décharge solaire MPPT est appelé à remplacer à terme le contrôleur solaire traditionnel. [28]

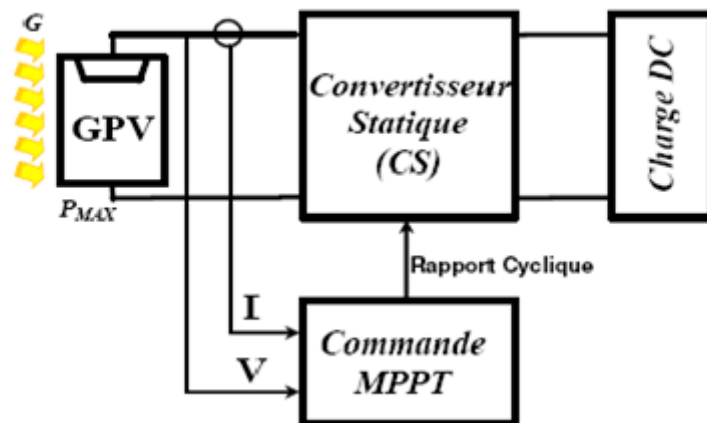


Figure III.5 : Schéma de principe du convertisseur MPPT

## II.8 Classification des commandes MPPT

La classification peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentée : directes et indirectes

### II.8.1 MPPT indirecte

Les méthodes indirectes sont basées sur la courbe de la caractéristique du générateur photovoltaïque. Le principe est de constituer une table correspondant aux tensions optimales pour une température et un ensoleillement donné. La tension du GPV est comparée avec cette table afin d'ajuster le rapport cyclique pour s'approcher le mieux possible de la valeur optimale. Ces commandes ont l'avantage d'être simple à mettre en œuvre ; néanmoins, elles nécessitent une grande capacité de mémoire pour stocker les données. [29]

### II.8.2 MPPT directe

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. La détermination de la valeur la puissance de générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

## II.9 Algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

L'objectif d'exploiter un algorithme MPPT est de garantir dans toutes les conditions d'environnement climatique (en particulier le rayonnement solaire et la température) l'extraction de la puissance maximale des modules PV. Ceci est réalisé en faisant correspondre le point de puissance maximale (MPP) du PV avec la tension et le courant de fonctionnement du convertisseur de puissance. Lors de l'augmentation ou de la diminution de la température ou/et de l'irradiation, l'énergie solaire varie en fonction de ces changements atmosphériques, le point de puissance maximale évolue donc et correspond à une tension et un courant particulier. L'objectif de la plupart des techniques MPPT est d'atteindre le courant et la tension PV qui correspondent au point de puissance maximale sous différentes température et irradiation. Les paragraphes suivants décrivent les divers L'algorithme MPPT documentés dans la littérature. Dans tous les cas, la capture des grandeurs électriques I et V puis la multiplication de ces deux grandeurs aboutissent à la détermination de la puissance réelle du générateur PV.

### II.9.1 Méthode de la tension du circuit ouvert (FCO)

La technique de la tension du circuit ouvert est basée sur la relation linéaire entre la tension du circuit ouvert et la tension du point de puissance maximale. Cette relation est décrite dans l'équation (II.1)

$$Vmpp = k * Vco \quad (II.1)$$

Avec  $V_{mpp}$  est la tension du point de puissance maximale,  $V_{CO}$  est la tension du circuit ouvert et  $k$  est un facteur qui dépend des caractéristiques du système PV et qui peut varier entre 0.73 et 0.8. En effet, le point de fonctionnement du système PV sera maintenu près de la zone du point de puissance maximale en changeant la tension du système jusqu'à atteindre la tension optimale calculée. [30]

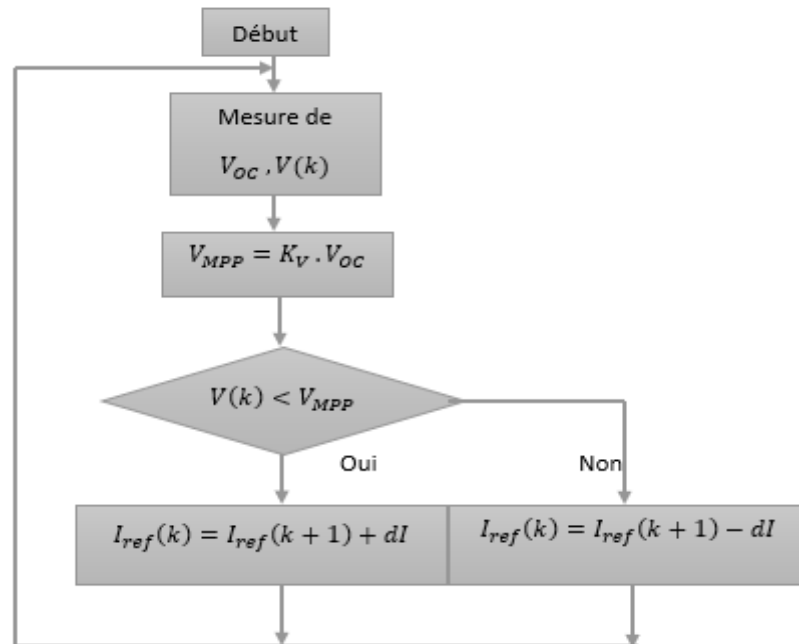


Figure II.6 : Schéma bloc de l'algorithme tension du circuit ouvert FCO

### II.9.2 Méthode du courant de court-circuit (FCC)

La technique du courant de court-circuit est l'une des méthodes les plus simples car elle dépend des caractéristiques du système photovoltaïque. Le point de puissance maximale peut être atteint en utilisant le courant maximal comme courant de référence pour le contrôleur dans la relation suivante.

$$I_{mpp} = K * I_{cc} \quad (\text{II.2})$$

Avec  $I_{mpp}$  est le courant du point de puissance maximale,  $k$  est un facteur qui varie entre 0.78 et 0.92 et  $I_{cc}$  est le courant de court-circuit.

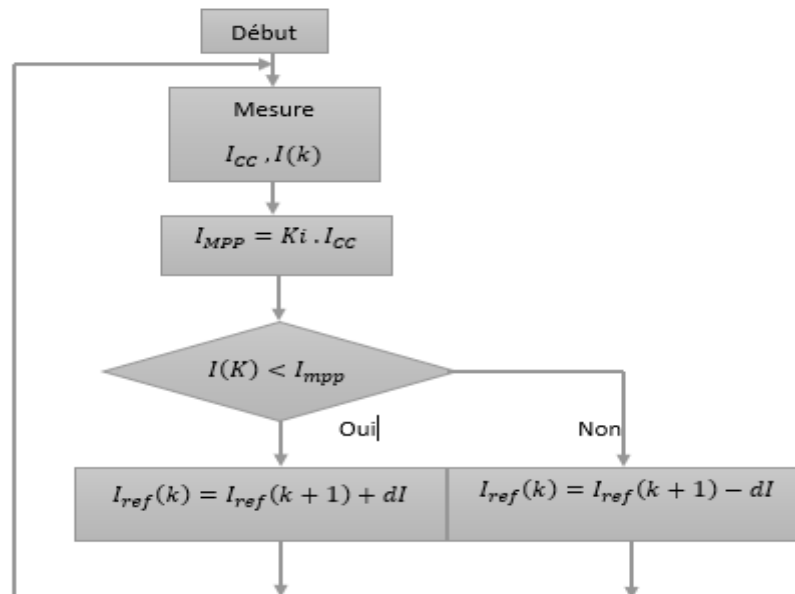


Figure II.7 : Schéma bloc de l'algorithme FCC

### II.9.3 Méthode de la perturbation et observation (P&O)

La méthode Perturbation et Observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le PPM : on mesure le courant et la tension du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension et /ou le courant afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte. Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_V$  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.8) [31] : lorsque le point de fonctionnement du module PV est sur le côté gauche de la courbe ( $\Delta P/\Delta V$  est positif), ce qui signifie que la puissance de sortie du module PV augmente, la perturbation de la tension du module PV devrait être augmentée vers le MPP. Si le point de fonctionnement du module se trouve sur le côté droit de la courbe ( $\Delta P/\Delta V$  est négatif), la perturbation de la tension du module PV doit être réduite pour atteindre la MPP.

L'algorithme de la perturbation et observation (P&O) est généralement le plus appliqué dans le contrôle de l'algorithme MPPT pour les panneaux PV. Il présente une structure simple, un faible coût, une mise en œuvre facile, un nombre réduit de paramètres, la possibilité d'introduire des améliorations et peut aboutir à une efficacité de haut niveau. Cet algorithme dépend de l'étude de la relation entre la puissance de sortie du module PV et sa tension. Le comportement du panneau PV indiquant le MPP et le principe de fonctionnement est présenté dans la figure II.7 qui indique que le changement résultant de la puissance PV qui est expliqué comme suit : lorsque le point de fonctionnement du module PV est sur le côté gauche de la

courbe ( $\Delta P/\Delta V$  est positif), ce qui signifie que la puissance de sortie du module PV augmente, la perturbation de la tension du module PV devrait être augmentée vers le MPP. Si le point de fonctionnement du module se trouve sur le côté droit de la courbe ( $\Delta P/\Delta V$  est négatif), la perturbation de la tension du module PV doit être réduite pour atteindre la MPP.

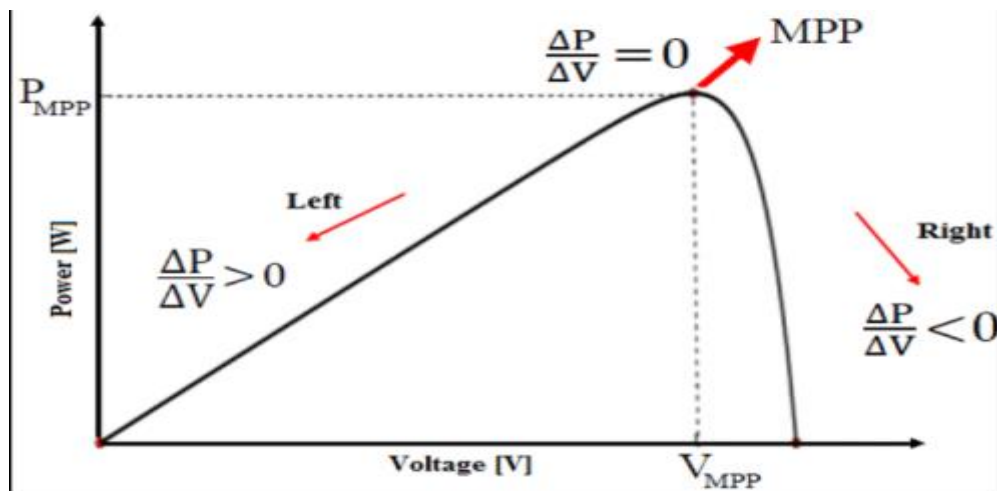


Figure II.8 : Schéma bloc de l'algorithme P&O

#### II.9.4 Méthode de la conductance incrémentale (INC)

Dans l'algorithme de conductance incrémentale (INC), le contrôleur mesure les changements incrémentiels de la tension et du courant du panneau PV pour prédire l'effet d'un changement de tension. Cet algorithme nécessite un calcul plus important dans le contrôleur, mais peut réagir plus efficacement aux changements rapides des conditions météorologiques que l'algorithme P&O. Comme l'algorithme P&O, des oscillations peuvent se présenter dans la puissance de sortie. Cette technique prend en entrée la conductance incrémentale ( $\Delta I/\Delta V$ ) du champ photovoltaïque afin de déterminer le signe de la variation de la puissance par rapport à la tension ( $\Delta P/\Delta V$ ). L'algorithme INC détermine le point de puissance maximale en faisant la comparaison entre la conductance incrémentale ( $\Delta I/\Delta V$ ) et celle du réseau ( $I/V$ ). Quand ces deux valeurs sont égales ( $\Delta I/\Delta V = I/V$ ), la tension de sortie est égale à la tension au MPP. Le contrôleur réagit pour fixer cette tension jusqu'à ce qu'on ait un changement d'irradiation ou une répétition du processus. L'algorithme INC est basé sur le fait qu'au point de puissance maximale  $\Delta P/\Delta V = 0$  et  $P = VI$ . L'algorithme de conductance incrémentale ne comporte que deux capteurs, des capteurs de tension et de courant, qui sont nécessaires pour mesurer la tension et le courant de sortie du dispositif PV.

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance ( $G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}}$ ) avec celle de l'incrément de conductance  $dG = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}}$  comme l'illustre l'algorithme de la figure (II.9).

$V_{ref}$  Correspond à la tension de référence et force le GPV de fonctionnera cette valeur. Si on est au MPP, alors la tension  $V_{ref}$  correspond bien à la tension optimale  $V_{opt}$ . Une fois le MPP atteint, le point de fonctionnement peut être maintenu sur cette position jusqu'à la détection d'une variation de  $\Delta I_{pv}$ . Cela indique alors un changement de condition climatique, donc un nouveau MPP à rechercher. Pour cela l'algorithme incrémente ou décrémente le  $V_{ref}$  jusqu' à atteindre le MPP.

$$\Delta I / \Delta V > 0 ; \text{ sur le cote gauche du MPP}$$

$$\Delta I / \Delta V < 0 ; \text{ sur le cote droite du MPP}$$

$$\Delta I / \Delta V = 0 ; \text{ au MPP}$$

Comme :

$$\frac{dP}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV} \approx I + V * \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{II.3})$$

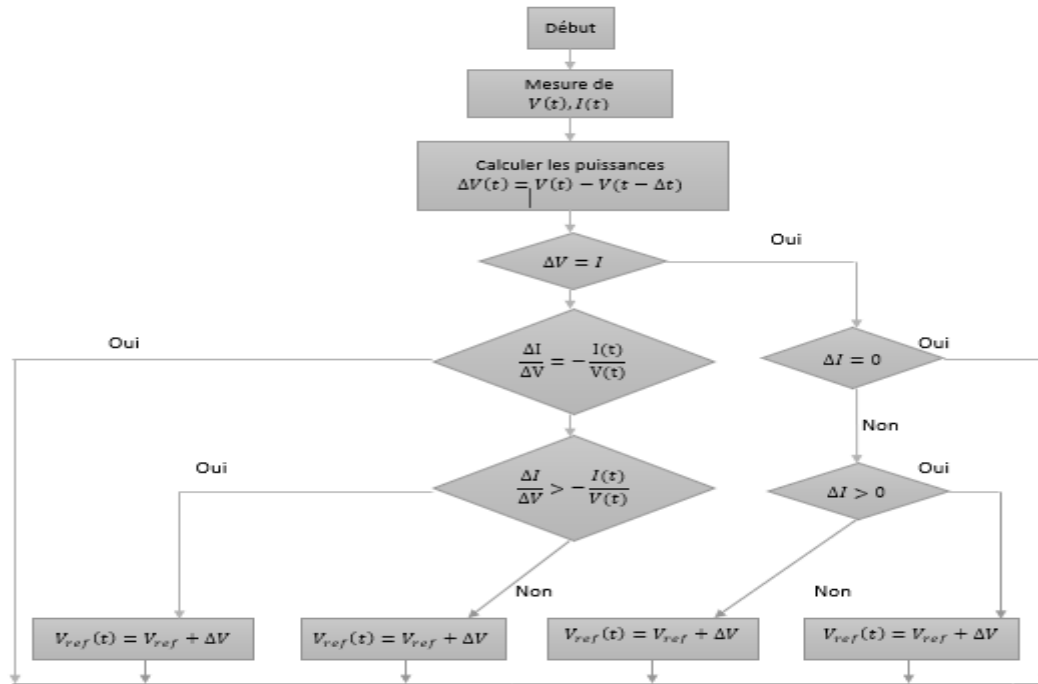


Figure II.9 : Schéma bloc de l'algorithme de la conductance incrémentale INC

### II.9.5 Algorithme basé sur la logique floue

La logique floue est une approche utilisée en intelligence artificielle, basée sur des « valeurs ou degrés de vérité » exprimés par des nombres réels compris entre 0 et 1. En cela, elle diffère de la logique booléenne classique, qui repose sur deux valeurs uniquement : vrai ou faux (1 ou 0). Autrement dit, cette logique dite polyvalente admet la possibilité de vérités partielles, situées entre les deux extrêmes 0 et 1. La logique floue a été formulée par le mathématicien Lotfi Zadeh dans les années 1960, dans le cadre de ses recherches sur la compréhension du langage naturel par les ordinateurs.

Difficilement traduisible en termes absolus et binaires comme 0 ou 1, le langage naturel ne peut être décrit avec une logique strictement booléenne. Il fallait, pour résoudre ce problème, développer une logique plus proche du fonctionnement du cerveau humain, qui tend à combiner des vérités partielles pour parvenir à une décision acceptable. La logique floue permet cela en représentant de façon plus fidèle les capacités cognitives humaines. Elle s'avère ainsi essentielle à la conception et au développement de fonctionnalités d'intelligences artificielles confrontées à des tâches complexes et/ou inhabituelles.

Pour illustrer le fonctionnement de la logique floue, prenons l'exemple de la température de l'eau. Avec la logique booléenne classique, celle-ci ne peut être que soit « froide », soit « chaude », ou encore soit « en dessous de 20 °C », soit « au-dessus de 20 °C ». Même si l'on

modifie la température progressivement, elle restera toujours classée dans l'un des deux extrêmes.

En revanche, avec la logique floue, il est possible d'admettre des valeurs intermédiaires. L'eau peut ainsi être considérée comme « un peu moins froide », « tiède » ou encore « quasi chaude », avec un ensemble de possibilités bien plus vaste et nuancé. [32]

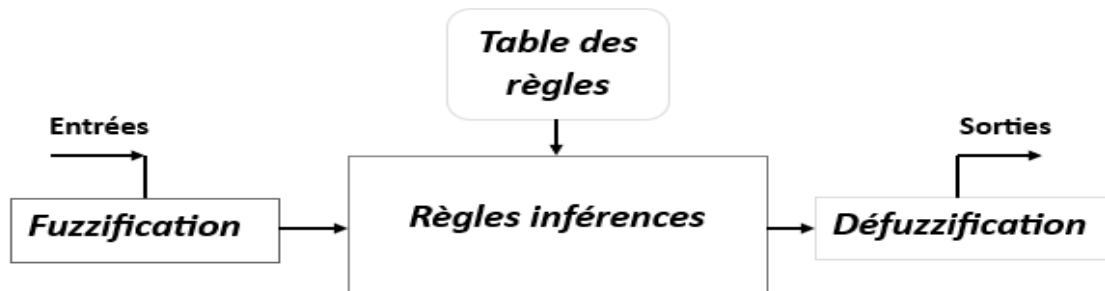


Figure II.10 : Structure principale d'un contrôleur logique floue

- L'interface de fuzzification transforme les entrées en des variables linguistiques que le bloc d'inférence peut ensuite utiliser pour désigner et suivre des règles.
- La base de connaissances (table des règles) comporte des règles Si-ALORS. Ces règles comprennent généralement des quantifications en logique floue effectuées par un expert afin d'atteindre un contrôle optimal.
- Le bloc des règles d'inférence imite de manière optimale la prise de décision des experts en comprenant les informations et en les appliquant, toujours dans le but de contrôler de manière optimale les facteurs d'entrée.
- L'interface de défuzzification transforme les résultats du bloc d'inférence en entrées numériques utilisables qui seront des entrées du système (processus).

Tableau II.I : Base de règles de logique floue

E /CE	NG	NP	Z	PP	PG
NG	Z	Z	NG	NG	NG
NP	Z	Z	NP	NP	NP
Z	NP	Z	Z	Z	PS
PP	PP	PP	PP	Z	Z
PG	PG	PG	PG	Z	Z

### II.9.6 Optimisation par essaim de particules (PSO)

L'algorithme PSO est indépendant du problème, ce qui signifie que peu de connaissances spécifiques relatives à un problème donné sont nécessaires. Tout ce que nous devons savoir, c'est l'évaluation de la condition physique de chaque solution

L'optimisation par essaim de particules (PSO) a été conçue pour la première fois par J. Kennedy et R. Eberhart en 1995. Il s'agit d'un algorithme évolutif inspiré de la vie artificielle en général et des techniques de recherche d'autres algorithmes.

Le PSO utilise une stratégie de recherche basée sur une population. Le plus important dans cet algorithme sont les formules mathématiques à mettre à jour avec les particules de l'ensemble de l'essaim. Par conséquent, PSO est facile à manipuler et à utiliser.

- Supposons que l'espace de recherche soit en D-dimension, puis que la  $i$ -ème particule de l'essaim puisse être représentée par un vecteur en D-dimension.
- L'initialisation d'ensemble de particules que nous appelons « essaims » de manière aléatoire. Chaque particule peut changer de position dans l'espace de recherche, exactement comme un oiseau en vol qui cherche de la nourriture dans le ciel.
- Une particule d'un essaim ajuste sa nouvelle vitesse de déplacement en fonction de sa meilleure expérience, de la meilleure expérience de toutes les particules de l'essaim et de la vitesse de déplacement précédente.
- Ensuite, chaque particule se déplace vers une nouvelle position en fonction de la vitesse nouvellement générée et de sa position précédente. [33]

Dans cet algorithme, chaque solution potentielle d'un problème d'optimisation est traitée comme un oiseau à la recherche de nourriture, avec un ensemble fixe de paramètres, et compare ensuite sa solution avec celle des autres pour trouver la meilleure. Chaque "oiseau" cherche la réponse dans un espace multidimensionnel, en ajustant sa position selon son expérience passée et celle de ses voisins.

Chaque point dans l'espace a une vitesse et une position.

Pour amener la particule vers la meilleure position, la vitesse initiale est modifiée (augmentée ou diminuée).

Si la particule actuelle détient la meilleure position, sa vitesse est augmentée ; dans le cas contraire, elle est réduite.

Cette méthode d'optimisation se base sur la collaboration des individus entre eux. Elle a d'ailleurs des similarités avec les algorithmes de colonies de fourmis, qui s'appuient eux aussi sur le concept d'auto-organisation. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu intelligents peut posséder une organisation globale complexe.

Ainsi, grâce à des règles de déplacement très simples (dans l'espace des solutions), les particules peuvent converger progressivement vers un minimum global. Cette métaheuristique semble cependant mieux fonctionner pour des espaces en variables continues.

L'équation de cette technique d'optimisation est donnée comme suit :

$$V_x^{\{k+1\}} = V_x^k + C_1 r_1 (P_{\{best\}} - d) \quad (\text{II.4})$$

$$P_x^{\{k+1\}} = d + V_x^{\{k+1\}} \quad (\text{II.5})$$

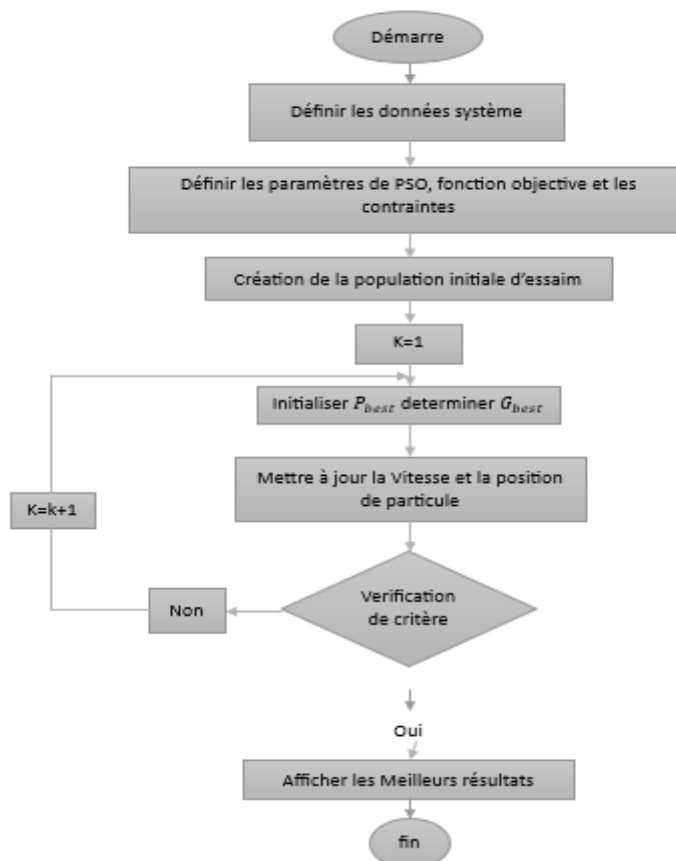


Figure II.11: Organigramme de l'Optimisation par Essaim de Particules (PSO)

## **II.10 Conclusion**

Ce chapitre a permis de mettre en lumière le rôle fondamental des convertisseurs DC/DC dans l'adaptation de la tension issue d'un générateur photovoltaïque, en vue d'optimiser le transfert de puissance vers la charge. Après avoir décrit les différentes topologies de convertisseurs, nous avons détaillé les principes et enjeux du suivi du point de puissance maximale (MPPT), un processus indispensable pour tirer le meilleur parti d'un système PV.

Nous avons ensuite présenté une classification des techniques MPPT, en distinguant les approches classiques (FCO, FCC, P&O, INC) et les approches intelligentes telles que la logique floue et l'optimisation par essaim de particules (PSO). Ce dernier type d'approche présente un potentiel intéressant pour le suivi efficace de la puissance maximale, en particulier dans des conditions complexes comme l'ombrage partiel, où le point de puissance maximale peut devenir multiple et difficile à localiser.

Ainsi, les fondements théoriques exposés dans ce chapitre serviront de socle à l'analyse et à la mise en œuvre, dans les chapitres suivants, de stratégies MPPT robustes et adaptées aux conditions réelles d'ombrage partiel.

# **Chapitre III : Simulation et discussion des résultats**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents résultats de simulation par l'environnement 'Simulink' de MATLAB. Le 'Simulink' nous permet d'établir les différentes commandes MPPT et de changer facilement les conditions atmosphériques (Eclairage, température), le système complet à simuler contient : Le générateur photovoltaïque, les convertisseurs DC/DC, les commandes MPPT et la charge. Ensuite nous présentons les graphes obtenus par les différentes commandes et on discute les résultats.

### III.2 L'outil Matlab/Simulink

MATLAB est une plateforme de calcul numérique et de programmation utilisée par des millions d'ingénieurs et de scientifiques pour analyser des données, développer des algorithmes et créer des modèles. En plus du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels parfaitement intégrés à l'ensemble :

- ✓ Une large gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Boîtes à outils).
- ✓ Simulink, un environnement de modélisation puissant basé sur des schémas fonctionnels et la simulation de systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- ✓ D'autres modules dont un compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- ✓ Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : l'Atelier DSP.

Simulink est une plateforme de simulation multi-domaines et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques de modélisation qui permet de spécifier la conception, la simulation, l'application et le contrôle des systèmes de communication, de traitement du signal, de l'automatique, des systèmes photovoltaïques, ....

### III.3 Simulation du système photovoltaïque

La figure (III.1) illustre le modèle proposé sous MATLAB/Simulink d'un système photovoltaïque complet. Ce modèle inclut un générateur PV, un convertisseur Boost DC/DC, et une technique MPPT basée sur l'algorithme Perturb & Observe (P&O).

### III.4 Simulation du système photovoltaïque sous les 3 commandes

La figure (III.1) montre le modèle proposé sous MATLAB/Simulink du système PV complet qui contient le générateur PV, le convertisseur DC/DC, les différentes techniques MPPT mentionnées ci-dessus et la charge. Les algorithmes MPPT sont appliqués dans le contrôleur pour fournir au convertisseur le cycle de service optimal pour atteindre la puissance maximale du système PV pour différentes valeurs d'éclairement.

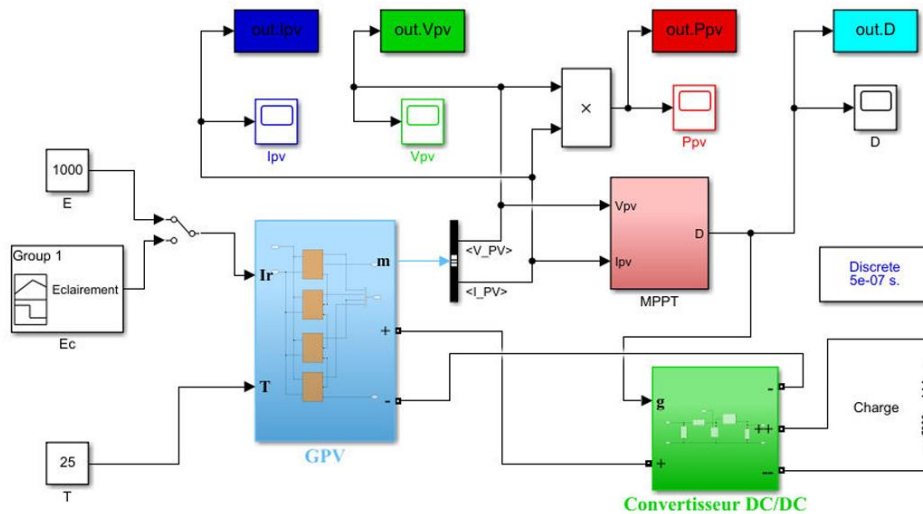


Figure III.1: Modèle du système PV sous Simulink

#### III.4.1 Résultats obtenus et discussion

Les résultats de simulation sont utilisés pour évaluer les performances des méthodes MPPT. Notre générateur photovoltaïque est composé d'un panneau photovoltaïque de type Advanced renewable energy AREI-230W-M6-G, ce panneau PV polycristallin génère environ de 230 W sous les conditions STC, il est simulé pour voir à quel point il est précis et stable lorsque l'éclairement solaire change soudainement et de manière aléatoire. Les paramètres de ce panneau sont donnés par le tableau ci-dessous :

Tableau III.1 : Caractéristiques du panneau PV AREI-230W-M6-G

Paramètres	Valeur
Puissance maximal ( $P_{max}$ )	230 W
Tension au MPP ( $V_{max}$ )	30.72 V
Courant au MPP ( $I_{max}$ )	7.5 A
Tension du circuit-ouvert $V_{CO}$	37.14 V
Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ )	8 A
Nombre de cellules en série ( $N_S$ )	60

Le profil d'éclairement solaire est illustré dans la figure suivante :

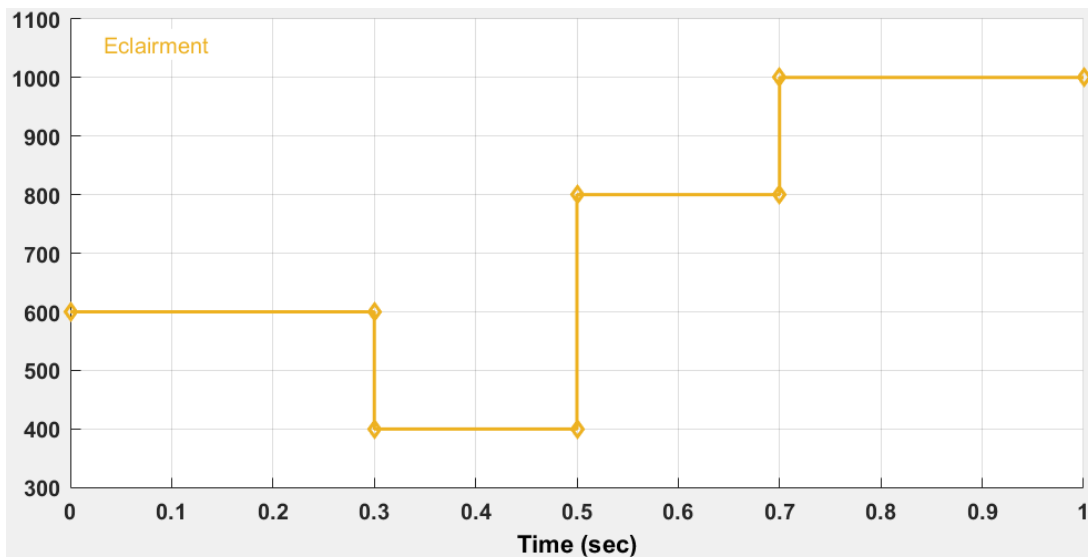


Figure III.2 : Profil de l'éclairement solaire

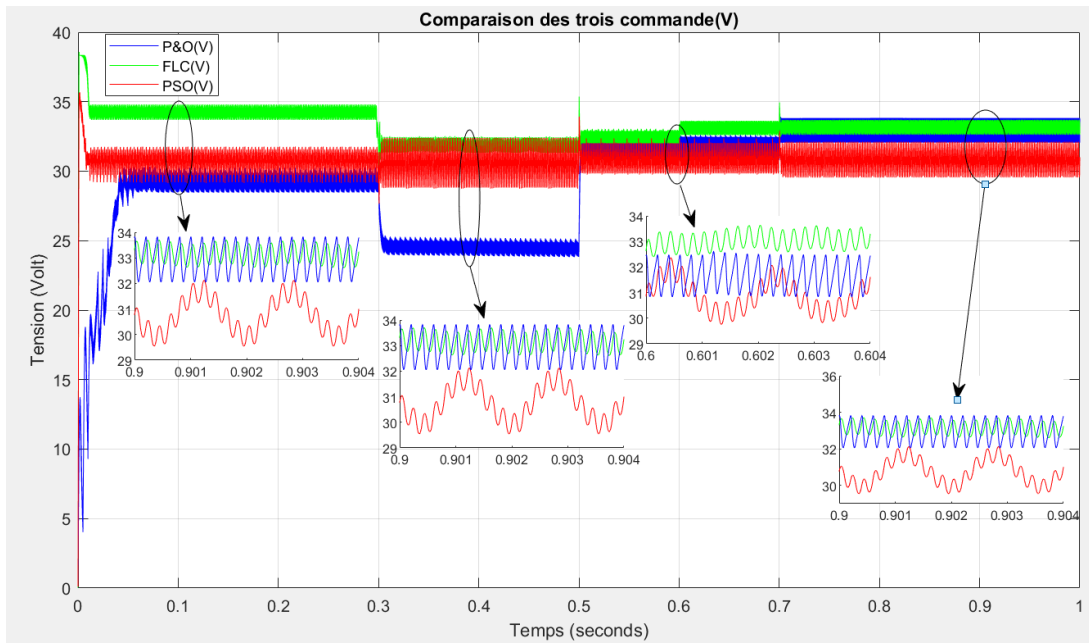


Figure III.3 : Courbes de tension pour différentes commandes MPPT sous éclaircement variable et température (25 °C)

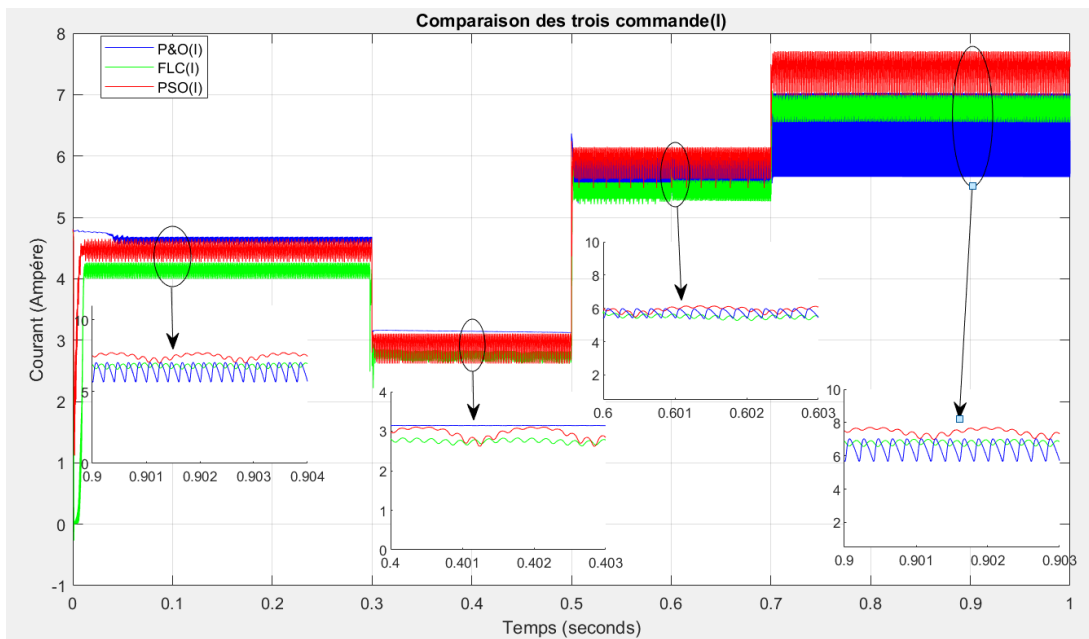


Figure III.4 : Courbes de courant pour différentes commandes MPPT sous éclaircement variable et température (25 °C)

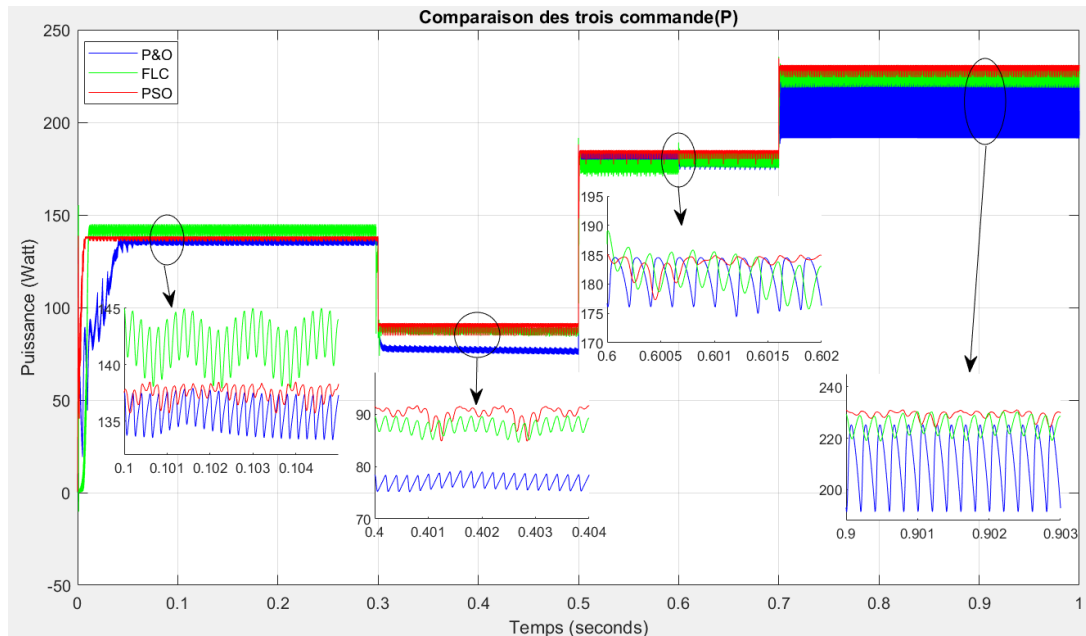


Figure III.5 : Courbes de puissance pour différentes commandes MPPT sous éclairement variable et température (25 °C)

Les courbes obtenues (tension, courant et puissance) montrent le comportement du système photovoltaïque soumis à différentes techniques de commande MPPT : P&O, logique floue (FLC) et PSO, face à un changement d'éclairage soudain. Régime transitoire (Zooms 1, 2, 3, 4) — changement d'irradiance Lors du passage d'un éclairage à un autre (par exemple de 800 à 1000 W/m<sup>2</sup>), on remarque les comportements suivants :

Tableau III.2 : Comparaison entre les techniques MPPT

MPPT	P&O	FLC	PSO
Temps de réponse	Lent	Moyenne	Rapide
Précision	Acceptable	Moyenne	Très bonne
Oscillations	Importantes	Moyenne	Négligeable
Complexité	Simple	Complexe	Moyenne
Identification des paramètres du GPV	Nécessaire	Nécessaire	Nécessaire

À partir des résultats de simulation obtenus et des statistiques de comparaison présentées dans le tableau précédent, nous constatons que l'optimisation par Essaim de Particules (PSO) offre de meilleures performances globales, avec des oscillations quasi nulles en régime permanent et un temps de réponse acceptable.

Les courbes mettent en évidence trois moments clés liés à des changements soudains d'éclairement solaire : à  $t = 0.3$  s,  $t = 0.6$  s et  $t = 0.9$  s, représentant les régimes transitoires du système. Ces transitions permettent d'évaluer la capacité des différents algorithmes à s'adapter aux variations d'irradiation.

On observe une relation directe entre l'éclairement et la puissance produite : lorsque l'ensoleillement augmente, la puissance photovoltaïque générée augmente également, conformément au comportement attendu d'un système PV.

En régime transitoire, la commande PSO réagit avec une bonne précision, bien que légèrement plus lente que les autres méthodes. Le contrôleur à logique floue (FLC) met environ 0.1 s pour atteindre la puissance maximale, tandis que les commandes P&O et FLC convergent plus rapidement, en 0.01 à 0.02 s, démontrant une meilleure rapidité de réponse.

En régime permanent, notamment à partir de  $t = 0.7$  s, les différences deviennent plus marquées. Le contrôleur P&O présente des oscillations importantes autour du point de puissance maximale (MPP), ce qui entraîne des pertes d'énergie. Le FLC réduit ces oscillations, mais elles restent présentes. Le PSO, en revanche, maintient une puissance stable avec des oscillations très faibles voire négligeables, ce qui le rend plus performant pour maximiser l'énergie extraite du système.

### III.5 Conclusion

Les simulations effectuées par l'utilisation des techniques P&O, PSO et la logique floue, sous différentes conditions météorologiques ont permis de dire que les résultats obtenus par le contrôleur MPPT PSO est meilleur que celle du contrôleur MPPT P&O et logique flou, du point de vue robustesse et précision vis-à-vis des changements des paramètres météorologiques (éclairement solaire). La puissance de charge suit bien la puissance du GPV quelques soient les variations d'éclairement solaire pour les trois contrôleurs. La

méthode P&O, bien qu'elle soit efficace en termes de poursuite du PPM, présente des pertes de puissance dues à l'oscillation du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale et un régime transitoire long. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT basé sur la logique floue a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire ; ce qui implique une amélioration du rendement du système.

# **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV), commandé par une technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurant l'extraction optimale de la puissance générée sous différentes conditions d'éclairement solaire. Dans un premier temps, nous avons introduit les notions fondamentales relatives aux énergies renouvelables, accompagnées de statistiques sur la production énergétique mondiale. Ensuite, nous avons détaillé la modélisation électrique et mathématique des différents composants du système PV, notamment les cellules solaires, les convertisseurs DC/DC (hacheurs), la charge, ainsi que les stratégies de commande MPPT étudiées.

Notre travail s'est principalement axé sur la mise en œuvre et la comparaison de plusieurs techniques MPPT, qu'elles soient classiques ou intelligentes. Les simulations réalisées sous différentes conditions atmosphériques nous ont permis d'analyser le comportement dynamique de chaque méthode, d'identifier leurs avantages et limites, et d'envisager des pistes d'amélioration en termes de rendement, de rapidité de convergence et de complexité de mise en œuvre.

Parmi les algorithmes étudiés, la méthode P&O (Perturb and Observe) se distingue par sa simplicité et sa rapidité de réponse aux variations d'ensoleillement, bien qu'elle présente des oscillations notables autour du point de puissance maximale, entraînant des pertes énergétiques. L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization), quant à lui, offre une meilleure précision et une convergence plus stable vers le point de puissance maximale. Bien qu'il soit plus complexe à implémenter, il montre une performance supérieure, notamment lors de variations brutales d'éclairement. Enfin, la commande par logique floue s'est révélée robuste face aux changements rapides des conditions climatiques, avec un comportement stable autour du point MPP, malgré un temps de réponse relativement lent.

Par ce travail, nous espérons avoir apporté une contribution significative à la compréhension des caractéristiques des cellules photovoltaïques, à l'étude des systèmes PV autonomes et aux différentes stratégies de commande MPPT, notamment la logique floue et l'algorithme PSO. En perspective, une implémentation matérielle de ces techniques

à l'aide de microcontrôleurs serait une étape importante afin de valider les résultats obtenus par simulation et confirmer les performances observées.

- [1] «reuters,» [En ligne]. Available: [https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/renewables-provided-record-32-global-electricity-2024-ember-says-2025-04-07/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/renewables-provided-record-32-global-electricity-2024-ember-says-2025-04-07/?utm_source=chatgpt.com).
- [2] L. James, "Everything you need to know about photovoltaics," 24 03 2021. [Online]. Available: [https://www.power-and-beyond.com/everything-you-need-to-know-about-photovoltaics-a-7c65263f83d5f2523ea0d3cf67b24e31/?cmp=go-ta-art-trf-PuB\\_DSA-20250123-coma&gad\\_source=1&gbraid=0AAAAADRfZcAgPQyxiGDTmvu2IEPYgMGoh&gclid=Cj0KQCjwqv2\\_BhC0ARIsAFb5Ac-m0i2YMUOUi](https://www.power-and-beyond.com/everything-you-need-to-know-about-photovoltaics-a-7c65263f83d5f2523ea0d3cf67b24e31/?cmp=go-ta-art-trf-PuB_DSA-20250123-coma&gad_source=1&gbraid=0AAAAADRfZcAgPQyxiGDTmvu2IEPYgMGoh&gclid=Cj0KQCjwqv2_BhC0ARIsAFb5Ac-m0i2YMUOUi).
- [3] «Production d'énergie dans le monde : chiffres clés par sources,» [En ligne]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-denergie-dans-le-monde#:~:text=La%20production%20mondiale%20s'%C3%A9%20ve,2022%20selon%20l'AIE..>
- [4] «Le stockage d'énergie : accompagner le déploiement des énergies renouvelables,» [En ligne]. Available: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement-et-economie-circulaire/stockage-denergie-accompagner-deploiement-des-energies-renouvelables>.
- [5] « Le stockage électrochimique de l'électricité,» 29 01 2025. [En ligne]. Available: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/stockage-de-l-energie-electrique/5-le-stockage-electrochimique-de-l-electricite/>.
- [6] "energy sources," [Online]. Available: <https://www.energy.gov/energy-sources#:~:text=Primary%20energy%20sources%20take%20many,%20solar%20geothermal%20and%20hydropower..>
- [7] S. p. f. (. Belgique, «L'énergie renouvelable et non renouvelable,» 2025. [En ligne]. Available: [https://www.belgium.be/fr/environnement/consommation\\_durable/sources\\_d\\_energie/energie#:~:text=L'%C3%A9nergie%20non%20renouvelable%20est,forme%20non%20renouvelable%20d'%C3%A9nergie..](https://www.belgium.be/fr/environnement/consommation_durable/sources_d_energie/energie#:~:text=L'%C3%A9nergie%20non%20renouvelable%20est,forme%20non%20renouvelable%20d'%C3%A9nergie..)
- [8] «Les énergies fossiles,» 08 09 2023. [En ligne]. Available: <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/energies-fossiles>.
- [9] B. d. l. e. d. l. c. d. l. Andrea Galindo, «Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ? La science de l'électronucléaire,» 17 04 2024. [En ligne]. Available: <https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/quest-ce-que-lenergie-nucleaire-la-science-de-lelectronucleaire#:~:text=L'%C3%A9nergie%20nucl%C3%A9aire%20est%20une,la%20fusion%20de%20plusieurs%20noyaux..>
- [10] «Les énergies renouvelables : qu'est-ce que c'est ?,» [En ligne]. Available: <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy>.
- [11] C. Dusanter, «définition et différents types d'exploitation,» 26 08 2024. [En ligne]. Available: <https://opera-energie.com/energie-solaire/>.
- [12] «Solaire photovoltaïque : fonctionnement, panneau et centrale,» [En ligne]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>.

- [13] «L'énergie éolienne,» 3 01 2024. [En ligne]. Available: <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/eolien>.
- [14] R. n. Canada, «Énergie géothermique,» 29 04 2024. [En ligne]. Available: <https://ressources-naturelles.canada.ca/source-energie/energies-renouvelables/energie-geothermique>.
- [15] EDF, «Qu'est-ce que la biomasse ? Comprendre l'énergie,» 2024. [En ligne]. Available: <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/thermique/biomasse>.
- [16] EDF, «: L'énergie hydraulique,» 01 2024. [En ligne]. Available: <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/hydraulique>.
- [17] "Advantages and Disadvantages of Renewable Energy," EnergySage, [Online]. Available: <https://www.energysage.com/about-clean-energy/advantages-and-disadvantages-of-renewable-energy/>. [Accessed 18 04 2025].
- [18] «L'énergie solaire photovoltaïque,» Tiaret, 2023.
- [19] «Rayonnement solaire,» Wikipedia contributors, 01 05 2025. [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement\\_solaire#:~:text=Le%20rayonnement%20solaire%20est%20l,passant%20par%20la%20lumi%C3%A8re%20visible..](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire#:~:text=Le%20rayonnement%20solaire%20est%20l,passant%20par%20la%20lumi%C3%A8re%20visible..)
- [20] « Effet photovoltaïque,» [En ligne]. Available: <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html>.
- [21] « Solaire photovoltaïque : fonctionnement, panneau et centrale,» [En ligne]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>.
- [22] «Systèmes autonomes,» 02 05 2025. [En ligne]. Available: <https://www.layer.it/fr/systemes-autonomes/>.
- [23] «Qu'est-ce qu'un système hybride PV-diesel ?,» 16 10 2023. [En ligne]. Available: <https://elum-energy.com/fr/blog/systeme-hybride-pv-diesel/#:~:text=Les%20installations%20solaires%20hybrides%20sont,diesel%2C%20%C3%A9galement%20appel%C3%A9s%20groupes%20%C3%A9lectrog%C3%A8nes..>
- [24] «Photovoltaïque raccordé au réseau,» [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Photovolta%C3%AFque\\_raccord%C3%A9\\_au\\_r%C3%A9seau](https://fr.wikipedia.org/wiki/Photovolta%C3%AFque_raccord%C3%A9_au_r%C3%A9seau).
- [25] « La cellule photovoltaïque,» [En ligne]. Available: <https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Cellule/Association.htm#:~:text=Les%20g%C3%A9n%C3%A9rateurs%20photovolta%C3%AFques%20sont%2C%20de,sont%20appel%C3%A9s%20modules%2C%20puis%20panne>.
- [26] «Production d'Énergie par cellules (panneau) photovoltaïque,» annaba, 2024.
- [27] «What is Maximum Power Point Tracking (MPPT) in Solar?,» 01 12 2023. [En ligne]. Available: <http://fr.fangpusun.com/news/what-is-maximum-power-point-tracking-mppt-in-78859840.html>.
- [28] G. Electrical, «Le principe de fonctionnement du MPPT photovoltaïque,» [En ligne]. Available: <https://www.geya.net/fr/the-working-principle-of-photovoltaic-mppt/>.
- [29] C. H. Tran, «Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement,» Reims, France, 2019.

- [30] B. G. Chortane, «Amélioration de l'algorithme MPPT pour un système PV par,» École de technologie supérieure (ÉTS), Université du Québec, MONTRÉAL,CANADA, 2022.
- [31] «Modelisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque,» ANNABA, 2019/2020.
- [32] «la logique floue,» *IA news*.
- [33] «Une approche intelligente pour un problème,» Guelma, 2019.
- [34] V. Rakotoson, «Répartition de la production électrique mondiale par source d'énergies primaires,» 12 2018. [En ligne]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Repartition-de-la-production-electriqueproduction-electrique-mondiale-par-source-d\\_fig1\\_336371670](https://www.researchgate.net/figure/Repartition-de-la-production-electriqueproduction-electrique-mondiale-par-source-d_fig1_336371670).
- [35] 08 08 2020. [En ligne]. Available: [https://web.facebook.com/WIsDARSUN/posts/une-installation-photovolta%C3%AFque-raccord%C3%A9e-au-r%C3%A9seau-comprend-les-composants-suiv/2711688862453836/?\\_rdc=1&\\_rdr#](https://web.facebook.com/WIsDARSUN/posts/une-installation-photovolta%C3%AFque-raccord%C3%A9e-au-r%C3%A9seau-comprend-les-composants-suiv/2711688862453836/?_rdc=1&_rdr#).
- [36] «Etude,modelisation et commande d'un system de pompage photovoltaïque,» SIDI-BEL-ABBES, 2018/2019.