



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued  
Faculté de la Technologie

Département de GENIE ELECTRIQUE

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : MACHINES ELECTRIQUE

Présenté par :

1. *MEDEKHEL AMARA*
2. *BEGGAA RIDA*
3. *KELKAMI BELKACEM IMAD EDDINE*

Intitule:

***ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE  
OPTIMISE PAR UNE TECHNIQUE MPPT***

Soutenu le: 29/05 /2025

Devant le jury composé de :

**Dr: Sarhoud Hicham**

**Président**

**Dr: Maamri oussama**

**Examineur**

**Dr: Boughezala Mohammed Salah**

**Encadreur**

Année académique: 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

### الملخص:

قدّمت هذه الدراسة لمحة عامة حول الطاقة الشمسية، تلتها عملية نمذجة ومحاكاة لنظام كهروضوئي بهدف توضيح كيفية تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية. ولتحسين كفاءة النظام بشكل أكبر، تم دمج تقنية تتبع أقصى نقطة للقدرة (MPPT) باستخدام خوارزمية الاضطراب والمراقبة (P&O)، وذلك لتعظيم القدرة المستخرجة من الخلايا الكهروضوئية تحت ظروف تشغيل مختلفة.

### الكلمات المفتاحية

الطاقة الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، تتبع أقصى نقطة للقدرة، خوارزمية الاضطراب والمراقبة.

### Résumé :

Cette étude présente un aperçu général de l'énergie solaire, suivi par la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque, dans le but d'illustrer le processus de conversion du rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide des cellules photovoltaïques.

Afin d'améliorer davantage l'efficacité du système, une technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) a été intégrée, en utilisant l'algorithme Perturb and Observe (P&O), dans le but d'optimiser la puissance extraite des cellules photovoltaïques sous différentes conditions de fonctionnement.

### Mots-clés

Énergie solaire, cellules photovoltaïques, suivi du point de puissance maximale, algorithme Perturb and Observe.

### Abstract:

This study presents a general overview of solar energy, followed by the modeling and simulation of a photovoltaic (PV) system, with the aim of illustrating how solar radiation is converted into electrical energy using photovoltaic cells.

To further improve the efficiency of the system, a Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique was integrated, using the Perturb and Observe (P&O) algorithm, in order to maximize the power extracted from the PV cells under different operating conditions.

### Keywords:

Solar energy, photovoltaic cells, maximum power point tracking, Perturb and Observe algorithm.

## Remerciement

Avant tout, nous adressons notre plus profonde gratitude à Allah, le Tout-Puissant, pour la force, la patience et la persévérance qu'Il nous a accordées afin de mener à bien ce travail.

Nous exprimons également notre sincère reconnaissance à l'administration de l'Université Hamma Lakhdar d'El Oued, ainsi qu'à l'ensemble des enseignants du département de génie électrique, pour leurs efforts inlassables visant à assurer la qualité, la continuité et la réussite de ce programme de Master.

Nos remerciements les plus respectueux vont à Monsieur **Bougzala Mohamed Salah**, pour son accompagnement bienveillant, ses conseils judicieux et son soutien constant tout au long de ce travail.

Nous remercions également les membres du jury pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'évaluation de ce mémoire.

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance, notre amour et notre respect à nos chers parents et à notre famille, pour leur soutien moral, leur présence réconfortante et leur affection inconditionnelle, qui ont été une véritable source de motivation tout au long de notre parcours.

## DÉDICACE

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.  
Louange à Dieu, par Sa grâce les bonnes œuvres s'accomplissent,  
Et que la paix et les bénédictions soient sur Son Prophète Mohammad,  
Ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

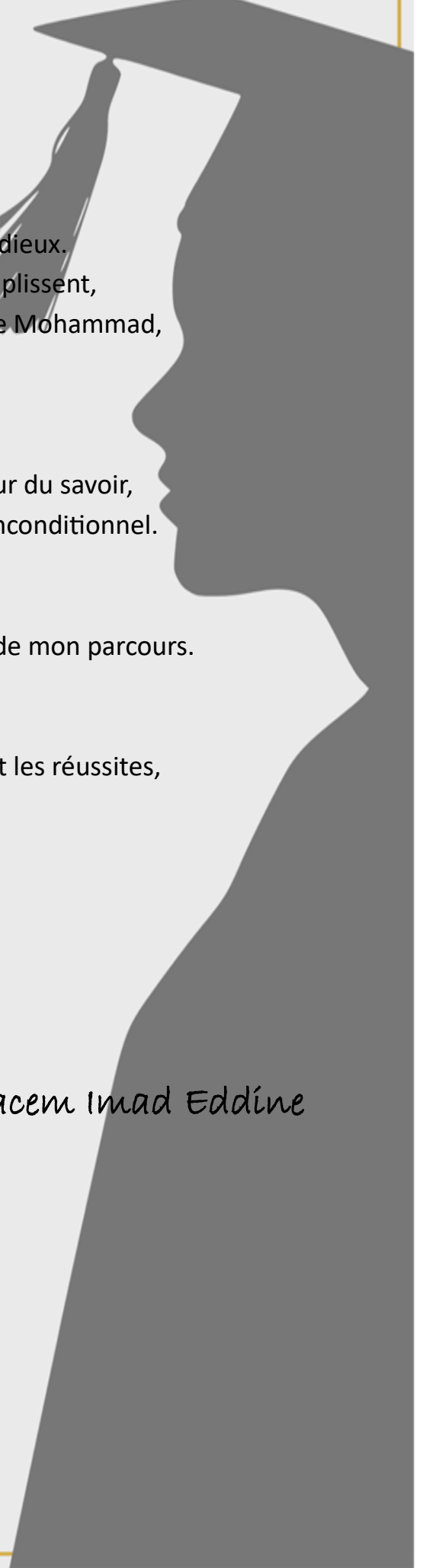
À mes chers parents,  
Qui m'ont inculqué les valeurs, la persévérance et l'amour du savoir,  
En reconnaissance de vos sacrifices et de votre soutien inconditionnel.

À mes professeurs respectés,  
Pour votre accompagnement et vos efforts tout au long de mon parcours.

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin,  
À mes camarades et amis avec qui j'ai partagé les défis et les réussites,  
Recevez l'expression de ma profonde gratitude.

Je vous dédie ce modeste travail,  
Comme témoignage de respect et de reconnaissance.

*KELKAMI Belkacem Imad Eddine*



## DÉDICACE

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.  
Louange à Allah, par Sa grâce les bonnes œuvres s'accomplissent.  
Et que la paix et les bénédictions soient sur notre Prophète Mohammad,  
Ainsi que sur sa noble famille et ses vertueux compagnons.

À mes chers parents,

Vous êtes la lumière de mon chemin, le pilier de ma force,  
Ce travail vous est dédié en hommage à vos sacrifices silencieux,

À votre amour infini, à vos prières constantes,

Et à la foi que vous avez toujours eue en moi.

Merci de m'avoir appris la valeur de l'effort et la noblesse du savoir.

À mes professeurs estimés,

Merci pour votre accompagnement, vos encouragements sincères

Et votre générosité dans la transmission du savoir.

Votre rôle a été essentiel dans mon évolution.

À mes camarades, amis et tous ceux

Qui m'ont soutenu de près ou de loin,

Dans les moments d'effort comme dans ceux de doute,

Merci pour votre présence, vos mots, votre écoute.

Je vous dédie ce modeste travail,

Comme une marque de respect, de reconnaissance et de gratitude profonde.

***MEDEKHEL Amara***

## DÉDICACE

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.  
Louange à Dieu, par Sa grâce les bonnes œuvres s'accomplissent,  
Et que la paix et les bénédictions soient sur Son Prophète Mohammad,  
Ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

À mes chers parents,  
Qui m'ont inculqué les valeurs, la persévérance et l'amour du savoir,  
En reconnaissance de vos sacrifices et de votre soutien inconditionnel.

À mes professeurs respectés,  
Pour votre accompagnement et vos efforts tout au long de mon parcours.

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin,  
À mes camarades et amis avec qui j'ai partagé les défis et les réussites,  
Recevez l'expression de ma profonde gratitude.

Je vous dédie ce modeste travail,  
Comme témoignage de respect et de reconnaissance.

BEGGA Rida

# TABLE DE MATIÈRES

<b>RESUME</b> .....	-
<b>REMERCIEMENT</b> .....	-
<b>DEDICACE</b> .....	-
<b>TABLE DE MATIÈRES</b> .....	-
<b>LISTE DE TABLEAU</b> .....	11
<b>LIST DE FIGURES</b> .....	12
<b>LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS</b> .....	14
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	15
<b>CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES SYSTEMES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES</b> .....	17
I.1 INTRODUCTION :	17
I.2 GISEMENT SOLAIRE ALGERIEN :	17
I.3 RAYONNEMENT SOLAIRE :	19
I.4 TYPES DE RAYONNEMENT:	19
I.4.1 RAYONNEMENT DIRECT:	19
I.4.2 RAYONNEMENT DIFFUSE:	19
I.4.3 EQUATIONS .....	20
I.5 CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :	20
I.5.1 Les cellules photovoltaïques au sein d'un panneau solaire .....	20
I.5.2 Les cellules poly cristallines .....	20
I.5.3 Les cellules monocristalline .....	21
I.5.4 Différence de performance entre les deux: .....	21
I.6 LA CONCEPTION D'UN PANNEAU SOLAIRE :	22
I.7 LA PUISSANCE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE:	25
I.8 LE SYSTEME DE DIODES BY-PASS :	30
I.9 LES CARACTERISTIQUES IMPORTANTES D'UN PANNEAU SOLAIRE:	32
I.9.1 Les caractéristiques principales: .....	32
I.10 LES GARANTIES :	34
I.10.1 Une garantie produite:.....	34
I.10.2 Une garantie sur la puissance : .....	34
I.11 L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL :	34
I.12 LA MAINTENANCE: .....	35
I.13 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :	35
I.13.1 Les critères influant sur le rendement de module pv: .....	36
I.13.2 L'utilisation des régulateurs de charge: .....	36
I.14 LES DIFFERENTS TYPES DU SYSTEME PV:.....	36
I.14.1 Systems autonomes: .....	36
I.14.2 Systèmes hybrids : .....	37
I.15 ASSOCIATION DES CELLULES PV: .....	37
I.15.1 Association série : .....	37

I.15.2 Connexion en parallèle :	38
I.15.3 Association mixte (hybride):	38
I.16 PROTECTION DES CELLULES PV :	39
I.16.1 La diode de blockage:	39
I.16.2 La diode by-pass :	40
I.17 MODELE ELECTRIQUE D'UNE CELLULE PV :	40
I.18 REGULATEUR DE CHARGE / DECHARGE :	41
I.19 LES AVANTAGES SPECIFIQUES DU PHOTOVOLTAÏQUE :	42
CONCLUSION	42

## **CHAPITRE II: MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME PV**

---

II.1 MODELE MATHEMATIQUE ET FORMULATION:	45
II.1.1 Modèle réel à une diode d'une cellule photovoltaïque:	45
II.1.2 Modèle à deux diodes :	46
II.1.3 Caractéristiques d'un module :	47
II.1.4 Simulation d'un système de panneaux solaires :	49
II.1.5 Modélisation Du Module PV :	49
II.2 LES CONVERTISSEURS:	51
II.2.1 Principe de fonctionnement d'un hacheur Boost :	51
II.2.2 Types de convertisseurs DC-DC :	53
II.2.3 Modèle mathématique équivalent du convertisseur :	55
II.2.4 Modèle approximé du convertisseur Boost :	56
II.2.5 Les variations des courants et des tensions du convertisseur :	57
II.2.6 Étude en régime continue :	58
II.2.7 Simulation d'un hacheur BOOST :	59
II.3 LA COMMANDE DE LA MPPT	60
II.3.1 Définition de la MPPT :	60
II.3.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal :	61
II.3.3 Classification des Commandes MPPT :	61
II.4 LES ALGORITHMES MPPT :	63
II.4.1 Méthodes a contre réaction de tension :	63
II.4.2 Méthodes a contre réaction de courant :	65
II.4.3 Méthodes a contre réaction de puissance :	65
II.5 ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME P&O :	65
II.6 AVANTAGES ET INCONVENIENT DE P&O :	68
II.6.1 Avantage:	68
II.6.2 Inconvenient:	68

## **CHAPITRE III : RESULTATS DE SIMULATION .....72**

III.1 RESULTATS DE SIMULATION (SYSTEME MPPT) :	72
III.1.1 Panneau Photovoltaïque :	72
III.1.2 Résultats:	76
III.2 L'HACHEUR BOOST :	77
III.3 CONTROLE MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING)	78
III.3.1 Gestion de la MPPT:	78
III.3.2 Description du fonctionnement:	82
III.4 CARACTERISTIQUE DE TENSION :	87

<b>CONCLUSION :</b> .....	<b>88</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>89</b>
<b>REFERENCES</b> .....	<b>91</b>

# LISTE DE TABLEAU

Table II.1 Caractéristiques électriques du module PV ..... 49

Table II.2 Paramètres de simulation. [17] ..... 59

# LIST DE FIGURES

<b>Figure I.1:</b> moyenne annuelle de l'irradiation solaire reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002.....	18
<b>Figure I.2 :</b> Irradiation directe journalière reçue sur le plan normal au mois de juillet en 1999 .....	18
<b>Figure I.3:</b> Les cellules poly cristallines .....	21
<b>Figure I.4:</b> Les cellules monocristallines .....	21
<b>Figure I.5:</b> Composition d'un panneau solaire photovoltaïque .....	23
<b>Figure I.6:</b> Panneau solaire photovoltaïque avec transparence .....	24
<b>Figure I.7:</b> Présentation de l'effet albedo pour des panneaux solaires photovoltaïques..	25
<b>Figure I.8:</b> Courbe typique de puissance d'un panneau solaire photovoltaïque .....	26
<b>Figure I.9:</b> point de puissance maximum (MPP) d'un panneau solaire photovoltaïque...	27
<b>Figure I.10:</b> Effet de la diode by-pass d'un panneau photovoltaïque.....	31
<b>Figure I.11:</b> Association série des cellules PV .....	38
<b>Figure I.12:</b> Association parallèle des cellules PV.....	38
<b>Figure I.13:</b> Association mixte des cellules PV .....	39
<b>Figure I.14:</b> Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode anti-retour ...	40
<b>Figure I.15:</b> Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode by-pass.....	40
<b>Figure I.16:</b> Modèle électrique de la cellule Photovoltaïque. Il existe deux types de régulateur de batterie, série et parallèle.....	41
<b>Figure I.17:</b> Les deux types de régulateurs de batterie .....	42
<b>Figure II.1</b> Schéma équivalent d'une cellule PV avec une diode.....	45
<b>Figure II.2</b> Modèle à deux diodes d'une cellule PV .....	46
<b>Figure II.3 :</b> model panneaux solaires sur MATLAB .....	49
<b>Figure II.4</b> Caractéristique courant-V d'une module PV .....	50
<b>Figure II.5</b> Caractéristique P-V d'un module PV .....	50
<b>Figure II.6</b> schéma de montage d'un hacheur Boost.....	51
<b>Figure II.7</b> schéma de montage GPV-Boost-Charge avec S fermée.....	52
<b>Figure II.8</b> schéma de montage GPV-Boost-Charge avec S ouverte.....	53
<b>Figure II.9</b> Convertisseur DC/DC .....	55
<b>Figure II.10</b> Allure des variables dynamiques IL .....	57
<b>Figure II.11</b> Modèle de simulation du hacheur .....	59

<b>Figure II.12</b> résultats de la simulation du hacheur au MATLAB .....	60
<b>Figure II.13</b> Chaîne de conversion d'énergie Solaire comprenant un régulateur MPPT .	61
<b>Figure II.14</b> Organigramme de classification des commandes MPPT .....	63
<b>Figure II.15</b> Algorithme de circuit ouvert.....	64
<b>Figure II.16</b> Organigramme d'algorithme Perturbation et Observation [16].....	67
<b>Figure III.1</b> Schéma de bloc de PV sur Matlab .....	73
<b>Figure III.2</b> Caractéristiques courant-tension pour différents éclairagements .....	74
<b>Figure III.3</b> Caractéristiques puissance-tension pour différents éclairagements.....	74
<b>Figure III.4</b> Caractéristiques puissance-tension pour différent températures .....	75
<b>Figure III.5</b> Caractéristiques courant-tension pour différentes températures .....	75
<b>Figure III.6.</b> Schéma bloc convertisseur BOOST.....	78
<b>Figure III.7</b> Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.....	79
<b>Figure III.8</b> Principe de la première commande MPPT numérique.....	80
<b>Figure III.9</b> schéma bloc de P&O .....	81
<b>Figure III.10</b> Caractéristiques de fonctionnement de l'Algorithme P&O .....	81
<b>Figure III.11</b> système PV de generation d'énergie et de tension .....	82
<b>Figure III.12</b> Caractéristiques de courant .....	84
<b>Figure III.13</b> Caractéristiques de voltage.....	84
<b>Figure III.14</b> caractéristiques et résultat de puissance.....	85
<b>Figure III.15</b> Évolution de l'irradiation solaire en paliers en fonction du temps.....	85
<b>Figure III.16:</b> Évolution du courant photovoltaïque en fonction du temps .....	86
<b>Figure III.17 :</b> Évolution de l'irradiation solaire en paliers en fonction du temps.....	87

# Liste des symboles et abréviations

**PV** : Photovoltaïque.

**GPV** : Générateur photovoltaïque.

**MPPT** : Maximum Power Point tracking.

**DC** : direct courant.

**BT** : base tension.

**Pm** : Puissance maximale (W).

**Im** : Courant de point de Puissance maximale (A).

**I** : Courant délivré par une cellule photovoltaïque (A).

**V** : tension délivrée par une cellule photovoltaïque (A).

**EG** : irradiation solaire.

**Eref** : irradiation de référence 1000 W/m<sup>2</sup>.

**Tj** : température de la cellule.

**Tref** : température de référence 25°C.

**Eg** : Energie de gap pour le silicium cristalline 1.12 eV.

**A** : Facteur d'idéalité de la jonction.

**N** : nombre de cellules en séries dans un module.

**Rs** : Résistance série.

**Rsh** : Résistance shunt.

**q** : La charge d'électron 1,6 .10<sup>-19</sup>C.

**K** : Constant de Boltzmann 1,38 .10<sup>-23</sup> J/K

**DS** : diamètre de soleil

**Dt** : Diamètre de la terre

**Wc** : watt crête

# Introduction générale

La demande mondiale en énergie électrique ne cesse de croître, et une grande partie de cette énergie provient encore de sources fossiles non renouvelables, générant des émissions de gaz à effet de serre et aggravant la pollution. L'énergie nucléaire, bien qu'efficace, présente des risques importants, notamment en matière de gestion des déchets radioactifs à longue durée de vie.

Face à ces enjeux, les énergies renouvelables, et en particulier l'énergie solaire, apparaissent comme une alternative propre, inépuisable et abondante. Les systèmes photovoltaïques (PV) permettent de convertir directement le rayonnement solaire en électricité. Cependant, leur efficacité reste limitée par divers facteurs, notamment le faible rendement de conversion, le comportement variable de l'ensoleillement, et l'absence d'optimisation énergétique.

Pour surmonter ces défis, plusieurs travaux de recherche visent à améliorer les matériaux photovoltaïques et à développer des techniques de commande adaptées, telles que le suivi du point de puissance maximale (MPPT – Maximum Power Point Tracking). Différentes méthodes MPPT existent, chacune avec ses avantages en termes de rapidité, complexité, coût et précision.

Parallèlement, l'évolution de l'électronique de puissance a permis le développement de nouvelles structures performantes comme l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC (Neutral Point Clamped), offrant une meilleure qualité de signal et un rendement élevé.

Avec l'amélioration continue de la technologie PV et la baisse des coûts de fabrication, les systèmes solaires se déploient de plus en plus, notamment dans les applications de faible puissance connectées au réseau basse tension. L'onduleur y joue un rôle clé, car ses caractéristiques influencent directement la qualité et la rentabilité de l'énergie produite.

Enfin, un système photovoltaïque peut être complété par des batteries pour répondre aux besoins hors période d'ensoleillement, ainsi que par un régulateur de charge pour protéger les batteries. Dans certaines applications, un onduleur est également nécessaire pour convertir le courant continu en courant alternatif

*Chapitre I :*  
*Généralités sur Les systèmes solaires*  
*photovoltaïques*

# Chapitre I: Généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques

## I.1 Introduction :

Afin de produire de l'énergie électrique, les systèmes solaires sont à base de cellules Photovoltaïques qui font la conversion des photons de la lumière en électricité, et donne par Chaque cellule, une puissance autour de 3 watts et avec une tension de 0.5 v. Pour avoir plus D'énergie, les cellules photovoltaïques sont connectées entre elle en série et/ou en parallèle Formant ce qu'on appelle un module photovoltaïque ou bien un panneau photovoltaïque (PV) Ces modules peuvent aussi être montés en série et/ou en parallèle formant un générateur PV Pour atteindre des différents niveaux de puissance selon le besoin. Dans ce chapitre, nous présenterons le principe de la conversion photovoltaïque, les types et Le modèle électrique de la cellule photovoltaïque.

## I.2 Gisement solaire algérien :

Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin Méditerranéen. Le Sahara représente environ 87% de la surface globale de l'Algérie, ce qui Représente la majeure partie du territoire Algérien, situé entre les latitudes 20° N et 34° N. Ainsi, La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien, de l'ordre de 3500h/an, est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale. [1]

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. [2]

La figurée (I.1) montre la moyenne annuelle de l'irradiation solaire reçue sur une surface

Horizontale, période 1992-2002. La figuree (I.2) et représentent respectivement

L'irradiation directe journalière reçue sur le plan normal au mois de juillet et décembre en 1999.

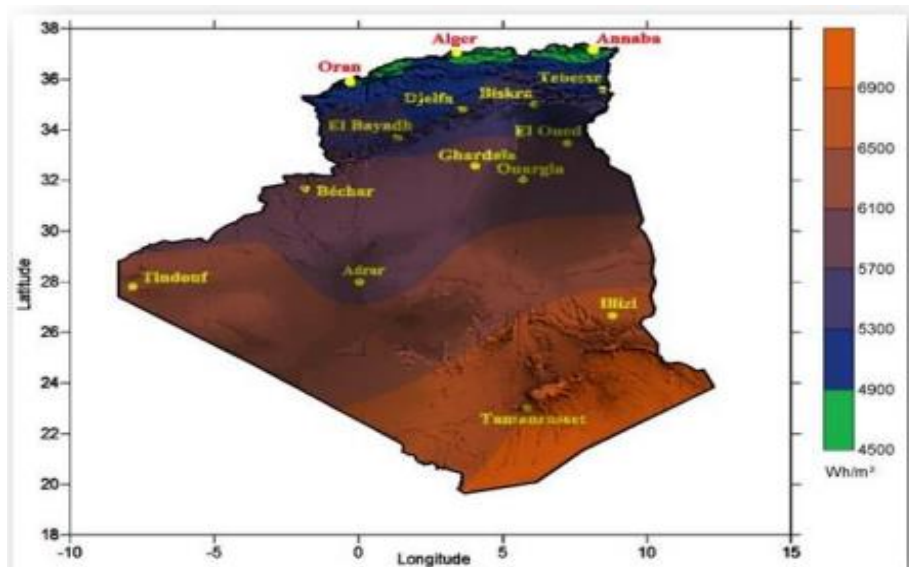


Figure I.1: moyenne annuelle de l'irradiation solaire reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002

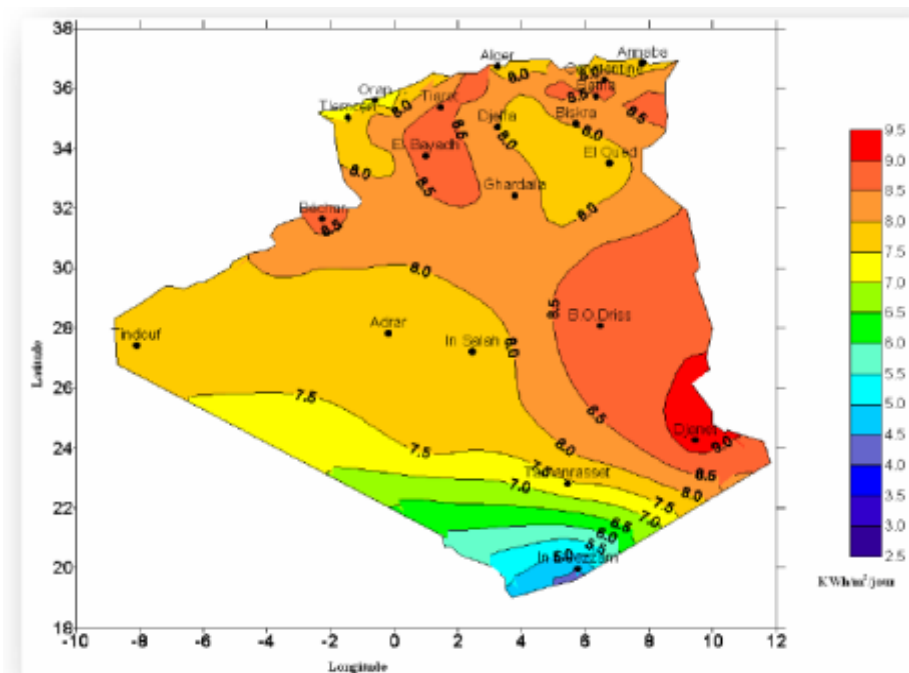


Figure I.2 : Irradiation directe journalière reçue sur le plan normal au mois de juillet en 1999

### I.3 Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnementInvalid source specified..

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 $\mu$ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K Invalid source specified.:

- Diamètre de soleil  $D_s = 1.39.10^9$ m ;
- Diamètre de la terre  $D_t = 1.27.10^7$ m ;
- Distance moyenne soleil\_ terre  $L_{ts} = 1.5. 10^{11}$ m.

### I.4 Types de rayonnement:

#### I.4.1 Rayonnement direct:

C'est le rayonnement qui vient directement du soleil sans n'être dévié ni dispersé.

- ✓ Présent pendant les journées ensoleillées et sans nuagesInvalid source specified..

#### I.4.2 Rayonnement diffuse:

C'est le rayonnement qui a été dispersé dans l'atmosphère par les nuages ou les particules.

- ✓ Présent même lorsque le soleil n'est pas visible Invalid source specified..
- ✓ Exemple : le reflet du soleil sur la terre

### I.4.3 Equations

- ✓ C'est la somme du rayonnement direct + diffus
- ✓ Utilisé pour mesurer l'énergie solaire totale reçue par les panneaux solaires.

## I.5 Cellule Photovoltaïque :

Le nom exact utilisé par la profession est « module solaire photovoltaïque ». De manière à rendre accessibles au plus grand nombre les informations qui suivent nous utiliserons souvent le terme « panneau solaire photovoltaïque » qui est le terme le plus utilisé, limitant au maximum la confusion avec une « cellule solaire photovoltaïque » dont nous parlerons plus tard. [3]

La finalité d'un panneau est de transformer l'irradiation solaire en énergie électrique, et plus précisément en courant continu. Nous allons voir comment cela est possible.

Un panneau photovoltaïque est composé de cellules solaires photovoltaïques.

### I.5.1 Les cellules photovoltaïques au sein d'un panneau solaire

Une cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de matériaux appelés semi-conducteurs qui ont des propriétés qui permettent à la cellule de transformer en courant continu une partie de l'irradiation solaire reçue. On parle d'effet photovoltaïque.

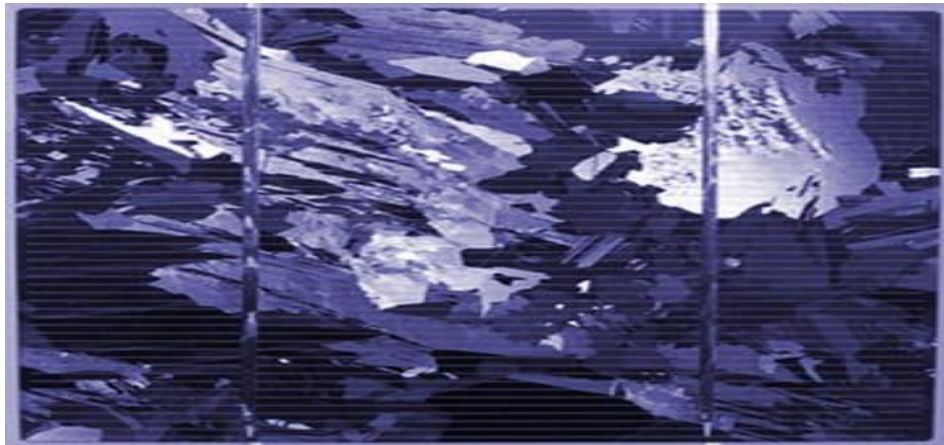
La partie de l'énergie reçue qui n'est pas transformée en courant se transforme en chaleur.

Il existe différents types de cellules en fonction du matériau à partir duquel elles sont faites. La majorité des cellules photovoltaïques utilisées aujourd'hui sont fabriquées à partir de silicium cristallin.

Le silicium utilisé peut-être sous 2 formes : monocristallin ou polycristallin. Cela dépend de la façon dont le silicium, sous forme de minerai, est purifié [5].

### I.5.2 Les cellules poly cristallines

Le silicium est sous la forme d'une multitude de cristaux, ce qui lui confère une couleur qui est plutôt bleue et non homogène (présence de reflets) [10].



**Figure I.3:** Les cellules poly cristallines

### **I.5.3 Les cellules monocristalline**

Le silicium est sous la forme d'un seul cristal, ce qui lui confère une couleur plus noire et homogène.



**Figure I.4:** Les cellules monocristallines

A noter que la technique pour obtenir du silicium monocristallin nécessite la consommation d'une quantité d'énergie plus importante, d'où un bilan carbone moins avantageux que pour le silicium polycristallin..

### **I.5.4 Différence de performance entre les deux:**

Les cellules en silicium monocristallin permettent d'avoir des rendements énergétiques légèrement plus importants que les cellules en silicium poly cristallin à surface équivalente.

Par ailleurs il est courant d'entendre que les cellules en silicium poly cristallin ont un rendement qui souffre moins de l'élévation de température que les cellules en silicium

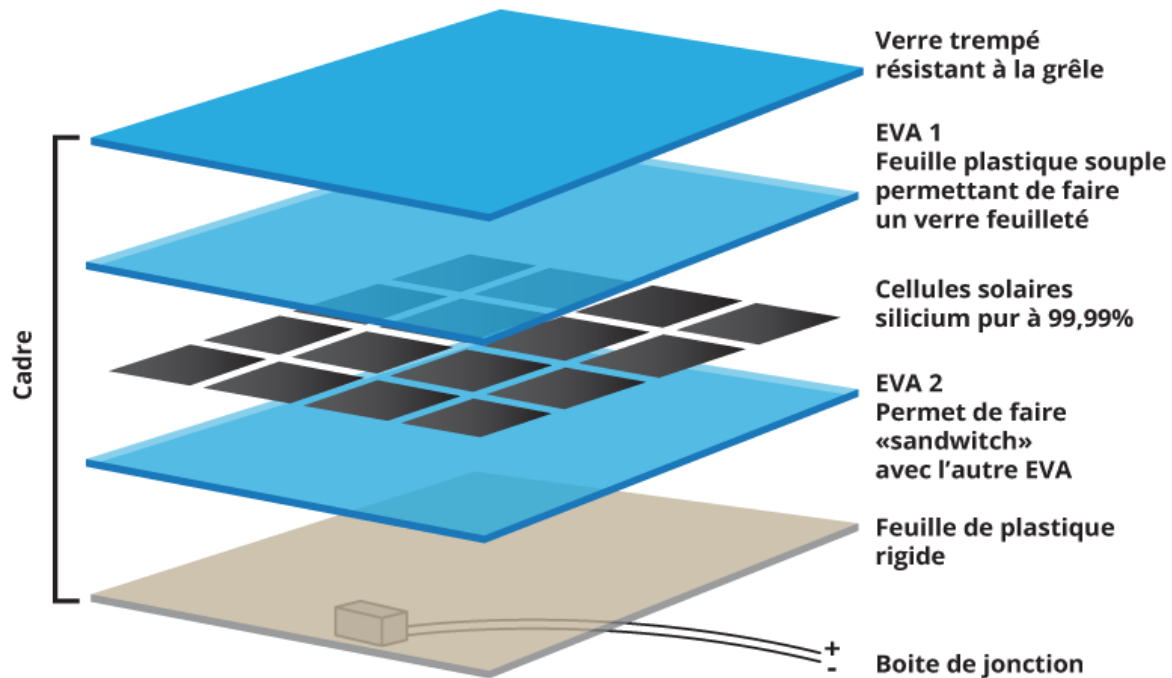
monocristallin, mais cette caractéristique dépendant d'autres paramètres, il suffit de se fier aux caractéristiques techniques d'un panneau pour s'affranchir de cette considération polycristallin/monocristallin. En effet, l'effet de la température sur le rendement est quantifié pour chaque panneau photovoltaïque.

A qualité/performances comparables, c'est le prix et l'esthétique qui guidera ensuite votre choix entre monocristallin et polycristallin.

### **I.6 La conception d'un panneau solaire :**

Un module (ou panneau) photovoltaïque est composé de cellules photovoltaïques reliées en série, et encapsulées de façon étanche entre 2 couches de copolymère. Le copolymère le plus souvent utilisé est l'EVA - éthylène-vinyl acetate, mais le POE (Octane-Ethylène) permet d'atteindre des durées de vie plus importantes.

Le dessus du panneau photovoltaïque est composé de verre pour le protéger des agressions extérieures (essentiellement la grêle). Le dessous est recouvert d'une feuille de plastique dur, nommée « Backsheet » par les professionnels, très souvent composée de poly fluorure de vinyle (Tedlar ®).



**Figure I.5:** Composition d'un panneau solaire photovoltaïque

C'est la configuration la plus classique. Mais il existe des panneaux solaires photovoltaïques « bi-verre », ce qui signifie que la feuille de plastique dur du dessous (back-sheet) est remplacée par du verre, comme pour le dessus.

Ils sont notamment utilisés pour laisser passer partiellement la lumière lorsque l'application le nécessite. C'est le cas par exemple pour certaines ombrières, ou hangars dans lequel on veut laisser entrer la lumière du jour.

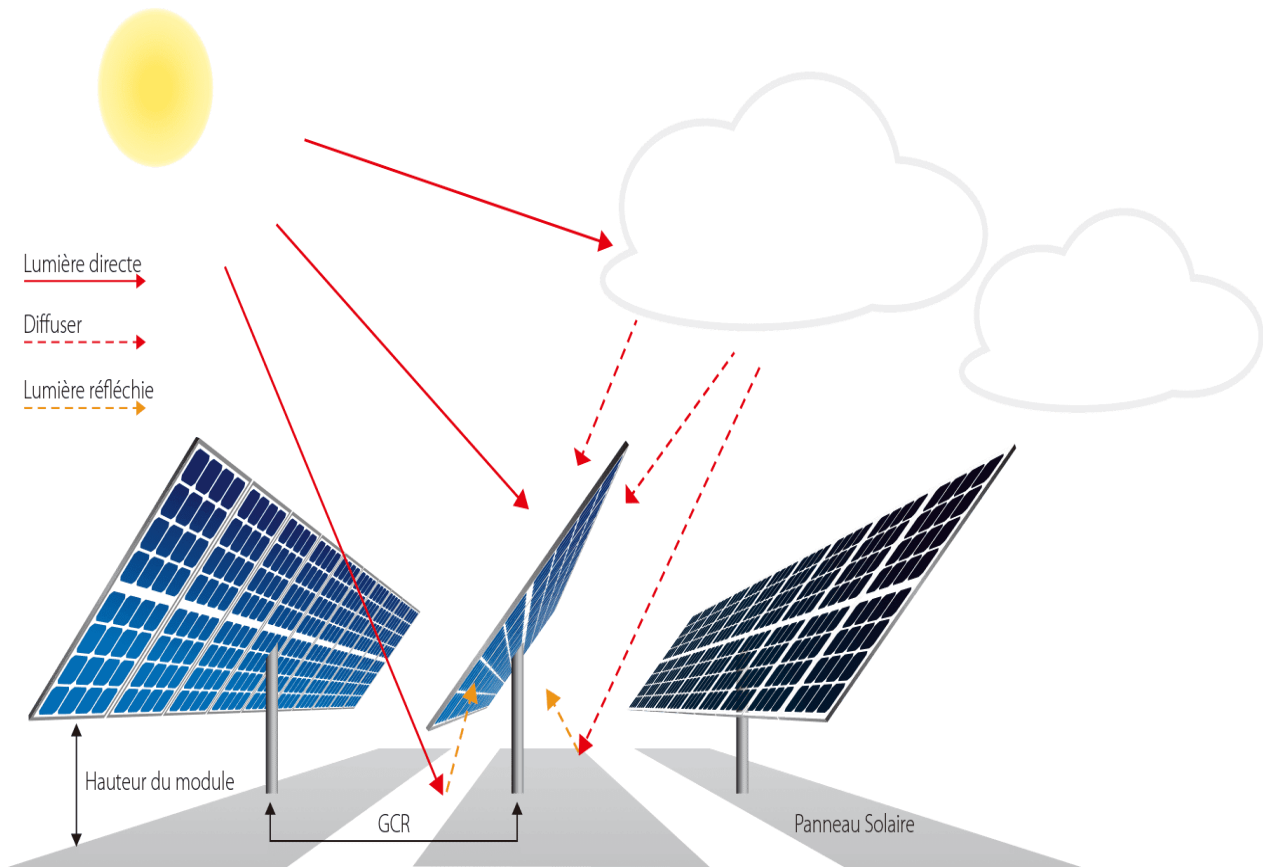


**Figure I.6:** Panneau solaire photovoltaïque avec transparence

Certains fournisseurs font varier le nombre de cellules photovoltaïques et leur espacement. Ainsi la transparence varie de façon inversement proportionnelle à la puissance car la puissance dépend du nombre de cellules.

Une autre variante permettant aussi de laisser passer en partie la lumière consiste à mettre un back-Sheets transparent plutôt qu'opaque.

La transparence peut être couplée avec l'utilisation de cellules dites «biface» c'est-à-dire capables d'absorber l'énergie lumineuse par les 2 faces, et non pas seulement par la face supérieure. Cela permet de récupérer une partie de l'énergie lumineuse qui se reflète sur la surface située sous les panneaux : c'est l'effet albedo. Certaines marques annoncent un gain de rendement jusqu'à 30% selon la couleur de la surface (albedo maximal lorsque la surface est blanche).



**Figure I.7:** Présentation de l'effet albedo pour des panneaux solaires photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque étant composé de cellules photovoltaïques qui produisent du courant continu, il produira donc lui aussi un courant continu.

Un panneau (ou module) photovoltaïque est poly cristallin ou monocristallin, selon qu'il est composé de cellules photovoltaïques poly cristallines ou monocristallines.

### I.7 La puissance d'un panneau photovoltaïque:

La puissance d'un panneau photovoltaïque s'exprime en «Watt crête» avec le symbole  $W_c$ , ou «Watt peak»  $W_p$  en anglais. C'est la puissance instantanée délivrable par le panneau sous les conditions STC (Standard Test Conditions), soit :

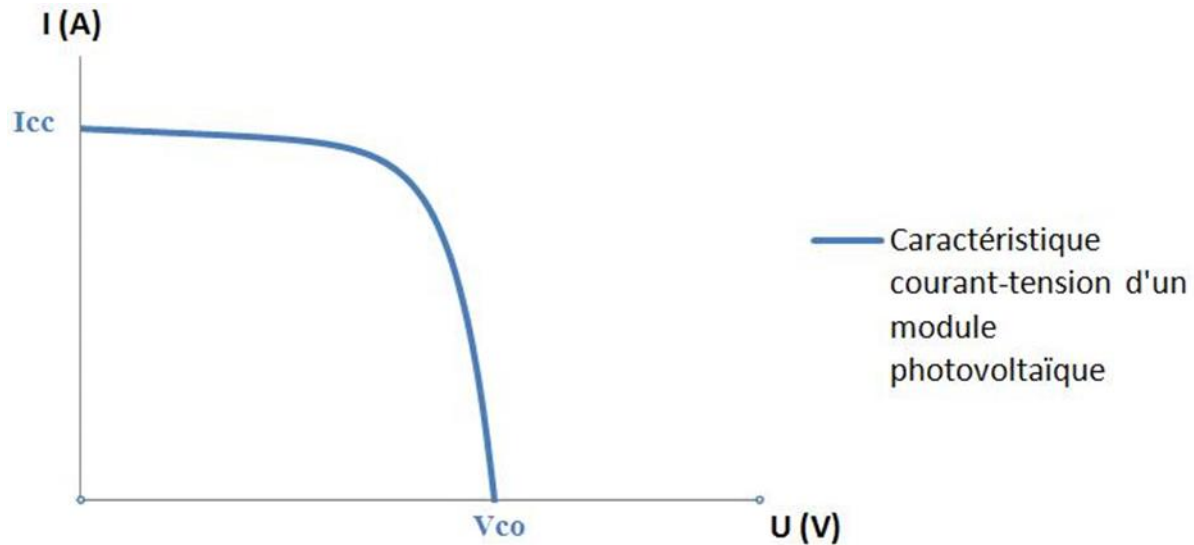
- Un ensoleillement instantané de  $1000 \text{ W/m}^2$  (ensoleillement maximal)
- Une température du panneau de  $25^\circ\text{C}$

- Un coefficient Air-Masse de 1,5

Un panneau photovoltaïque de 300Wc délivrera donc une puissance instantanée de 300W sous les conditions STC. Si l'ensoleillement est moins important (présence de nuage par exemple), alors la puissance instantanée en sortie de ce panneau sera inférieure à 300W.

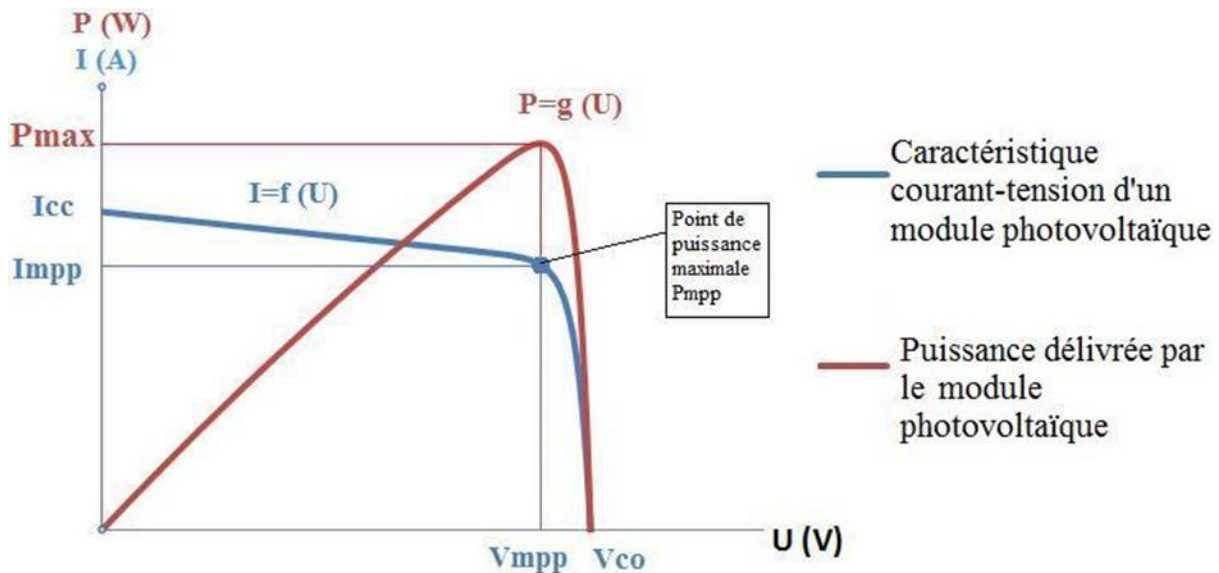
Le graphique ci-dessous illustre le profil type d'une courbe courant-tension d'un panneau photovoltaïque, où :

- $U_{co}$ : est la tension de circuit ouvert, c'est-à-dire celui mesuré aux bornes du panneau lorsqu'il est exposé à un ensoleillement, mais sans production de courant ( $I=0A$ )
- $I_{cc}$ : est la tension de court-circuit, dont la mesure peut être approchée en branchant un ampèremètre aux bornes lorsqu'il est exposé à la lumière (on s'approche alors du court-circuit avec la résistance très faible de l'ampèremètre).



**Figure I.8:** Courbe typique de puissance d'un panneau solaire photovoltaïque

A partir de cette courbe, et en utilisant la formule  $P = U \times I$ , il est possible de tracer la courbe de puissance afin de trouver le couple courant/tension qui donne la puissance maximale appelée  $P_{mpp}$ , mpp signifiant « Maximum Power Point » .



**Figure I.9:** point de puissance maximum (MPP) d'un panneau solaire photovoltaïque

Cette puissance maximale ( $P_{mpp}$ ) est atteinte avec le couple  $U_{mpp}$  et  $I_{mpp}$ , de sorte que  $P_{mpp} = U_{mpp} \times I_{mpp}$ .

Ce sera l'un des rôles de l'onduleur ou du micro-onduleur d'assurer l'atteinte de cette  $P_{mpp}$  grâce à la fonction MPPT (Maximum Power Point Tracker) : on parle de régulation MPPT.

La puissance de sortie d'un module solaire photovoltaïque varie en fonction de l'ensoleillement parce que la courbe courant-tension d'un panneau photovoltaïque change en fonction de l'ensoleillement comme l'illustre le graphique ci-dessous.

La puissance en  $W_c$  d'un panneau photovoltaïque correspond donc à la  $P_{mpp}$  obtenue pour une courbe courant-tension correspondant à un ensoleillement de  $1000W/m^2$  (et aux autres conditions des STC).

L'un des rôles de l'onduleur solaire (La régulation MPPT) est donc d'adapter en permanence la tension et l'intensité de sortie du panneau pour être au plus près du MPP, et ainsi obtenir la puissance maximale possible en fonction de l'ensoleillement.

**A Noter (1) :** La tolérance de rendement

Les cellules photovoltaïques qui composent un panneau n'ont pas toutes exactement le même rendement car le silicium cristallin dont elles sont issues n'est pas absolument uniforme avant d'être découpé en fines lamelles appelées Wafers. Par conséquent en bout de chaîne d'assemblage les panneaux photovoltaïques n'ont pas exactement le même rendement au 10ème de % près. Les tolérances sont comprises dans la fourchette -5% à 5%.

Par exemple si vous achetez 10 unités d'un même modèle de modules photovoltaïques annoncés à 300Wc avec une tolérance rendement de 0-5%, la puissance de chacun des panneaux photovoltaïques prise individuellement sera comprise entre 300 et 315Wc. C'est cette puissance (Pmax) qu'il faut prendre en considération dans le dimensionnement de l'onduleur solaire par exemple.

**A Noter (2) :** Cas particulier des panneaux bi-faciaux

Pour les panneaux photovoltaïques bi-faciaux la puissance crête indiquée ne tient pas compte de la puissance qui est générée par la face arrière. Pour ces panneaux il est encore plus important de tenir compte de la puissance maximale (Pmax) pour le dimensionnement de l'onduleur solaire.

Le rendement

Sur les fiches techniques des fabricants de panneaux solaires photovoltaïques on retrouve, en plus de la puissance en Wc, un rendement.

Le lien entre le rendement du panneau et sa puissance en Wc est assez simple.

Le rendement est le rapport entre la puissance en sortie et la puissance en entrée :

$$r(\%) = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entree}}} \times 100$$

**Dans les conditions STC, la puissance en entrée est de 1000W/m².**

Dans ces mêmes conditions, la puissance en sortie est la puissance exprimée en Wc. Mais cette puissance en Wc est obtenue pour une certaine dimension de panneau photovoltaïque. Il faut donc diviser cette puissance par la surface du panneau.

$$r = \frac{P_{\text{mpp}}(\text{w}) / \text{Surface}(\text{m}^2)}{1000(\text{w} / \text{m}^2)} \times \frac{P_{\text{mpp}}(\text{w})}{\text{Surface}(\text{m}^2) \times 10}$$

Prenons un panneau classique de 300Wc et de dimensions 1660mm x 990mm, soit 1,6434m<sup>2</sup>, alors le rendement de ce panneau sera de :

$$r = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entree}}} \times 100 = \frac{300/1.6434}{1000/1} \times 100 = 18.25\%$$

Notons que les rendements des panneaux solaires photovoltaïques mono-faces conçus à partir de silicium cristallin commercialisés atteignent des rendements compris entre 16% et 20%Invalid source specified..

Ce n'est pas anodin car pour fournir le maximum de puissance un panneau doit être exposé à un ensoleillement maximal, et donc sa température augmente.

Souvenez-vous ce que nous disions plus tôt : la part de la puissance solaire reçue par le capteur et qui n'est pas transformé en électricité se dissipe en chaleur.

Si un panneau photovoltaïque a un (super) rendement de 20%, cela signifie que les 80% restant (à quelques détails près) vont se transformer en chaleur et faire chauffer le panneau dont la température va augmenter et le rendement baisser.

Ce phénomène est quantifié sur les fiches fournies par les constructeurs de panneaux solaires photovoltaïques par les « coefficients thermiques ».

Pour la puissance, il s'exprime par exemple de la manière suivante: Coeff / Pmax = -0,40 % / °C

Pour cet exemple, pour chaque degré de plus que 25°C (STC), la puissance du panneau va perdre 0,40%. A l'inverse pour tout degré sous 25°C, la puissance du panneau va gagner 0,40%.

### **Pensez-y ! :**

Si vous choisissez une pose en intégration toiture : l'air circule très peu sous le panneau et la température de ce dernier augmente d'autant plus.

Alors qu'avec une pose en surimposition il y a un espace entre la tuile et les panneaux, qui permet la circulation de l'air pour freiner l'augmentation de la température.

### **I.8 Le système de diodes by-pass :**

Comme nous l'avons indiqué précédemment, les cellules d'un panneau photovoltaïque sont montées en série.

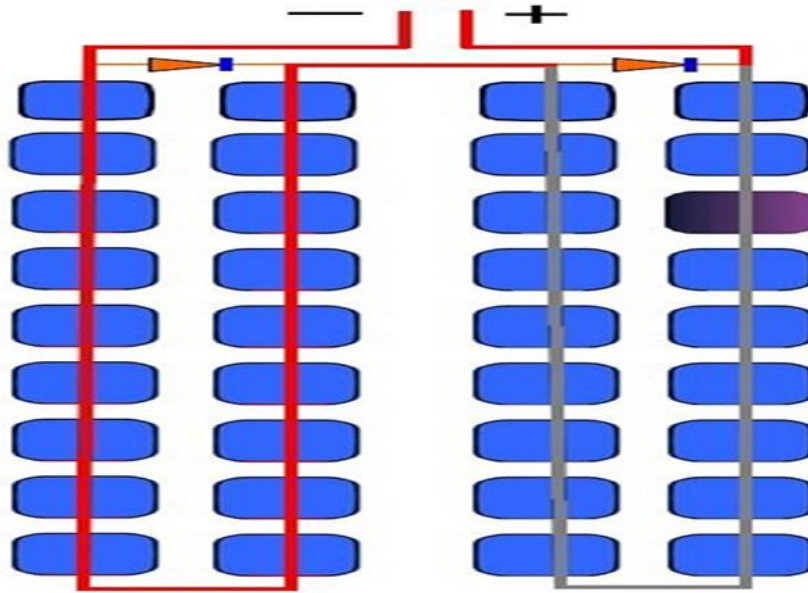
Par conséquent si l'une des cellules ne fonctionne pas, alors c'est l'ensemble du panneau qui ne fonctionne pas. En effet le courant ne pourra pas circuler entre les différentes cellules car « bloqué » par la cellule défaillante.

Cela peut se produire par exemple si une (ou plusieurs) cellule d'un panneau est ombragée, ou recouverte par des feuilles mortes par exemple.

Même si le dysfonctionnement de la cellule n'est pas total, mais que la puissance produite par la cellule est amoindrie par un encrassement par exemple (défection d'oiseau), alors toutes les cellules montées en série seront affectées. En effet c'est surtout son intensité  $I_{mpp}$  qui va être amoindrie et qui va ainsi dicter l' $I_{mpp}$  de chacune des autres cellules car l'intensité d'un circuit en série est la même en tous points de ce circuit.

Pour diminuer les conséquences de tels phénomènes (qu'il faudra veiller à éviter, ombrages et maintenance) les fabricants de panneaux solaires photovoltaïques mettent en œuvre des systèmes de diodes by-pass de sorte qu'une partie seulement du panneau soit annihilée par ce phénomène.

Ces systèmes offrent un parcours alternatif au courant qui peut ainsi "contourner" la ou les cellule(s) qui dysfonctionne(nt). Le schéma ci-dessous illustre ce phénomène :



**Figure I.10:** Effet de la diode by-pass d'un panneau photovoltaïque

Ce module photovoltaïque schématisé, constitué de 36 cellules, est équipé de 2 diodes by-pass qui permettent de diviser le panneau en 2 parties de 18 cellules chacune. Lorsque l'une des cellules (en bleu foncé) est défaillante, alors grâce au système by-pass le courant produit par les 18 cellules de droite peut circuler en shuntant la partie de gauche. Le chemin du courant est symbolisé par le trait rouge.

Et si le dysfonctionnement de la cellule n'est que partiel, alors seules les cellules sur le même sous-ensemble seront impactées car le courant de l'autre sous-ensemble passera par la diode by-pass.

NB: l'autre sous-ensemble sera en réalité légèrement impacté car les 2 sous-ensembles seront considérés comme en parallèle et la faible baisse de la tension du sous-ensemble contenant la cellule concernée affectera la tension de l'autre sous-ensemble (les tensions de 2 circuits en parallèle sont égales).

Le nombre de diodes by-pass dépend du fabricant et du modèle. C'est une caractéristique qui est indiquée sur la fiche technique du fournisseur, dans la partie «données générales» (ou

«General Data») et la rubrique «Boîtier de jonction» (ou «junction box»). La plupart des fabricants utilisent 3 diodes by-pass pour les panneaux composés de 60 cellules.

## I.9 Les caractéristiques importantes d'un panneau solaire:

Voici, en guise de résumé, les principales données de performance électriques qu'on retrouve sur la fiche technique d'un module solaire photovoltaïque.

Rappel, elles sont exprimées aux STC, soit les conditions de tests standardisées (STC): irradiation solaire de 1000W/m<sup>2</sup>, T° du panneau de 25°C et une masse d'air de 1,5.

### I.9.1 Les caractéristiques principales:

Nous avons qualifié ces données techniques de principales car ce sont les premières auxquelles il est nécessaire de s'intéresser au début du travail de dimensionnement. En effet, à partir de la surface disponible et de la puissance nécessaire, ces informations vous serviront à choisir le panneau le plus approprié à votre projet.

**La puissance (Wc):** P<sub>mpp</sub> est le terme technique que vous retrouverez sur les fiches produit = puissance maximale, exprimée en Wc (soit des Watts aux STC).

**Les dimensions :** Largeur et hauteur vous permettront de calpiner, c'est-à-dire définir le nombre et la position des modules sur votre surface

**Le poids: Le** poids vous sera utile pour vérifier si la structure sur laquelle va reposer l'installation (la charpente pour une toiture par exemple) pourra supporter le poids de l'ensemble. Pour une même typologie de panneau, le poids / m<sup>2</sup> varie peu d'un modèle à un autre. Par contre certaines typologies de panneaux solaires sont plus lourdes que d'autres, notamment les panneaux

Le rendement est en fait la résultante des 2 données précédentes. En effet c'est le rapport entre la puissance et la surface du panneau, divisé par 10, exprimé en %.

### **Explications:**

$$r(\%) = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entree}}} \times 100$$

La puissance d'entrée est l'irradiation pris aux STC, donc 1000 W/m<sup>2</sup>.

La puissance d'entrée doit donc s'exprimer aussi en W/m<sup>2</sup>, donc :

$$P_{\text{sortie}} = \frac{P_{\text{mpp}}(\text{W})}{S(\text{m}^2)}$$

On obtient donc :

$$r = \frac{P_{\text{mpp}}(\text{w}) / \text{Surface}(\text{m}^2)}{1000(\text{w} / \text{m}^2)} \times \frac{P_{\text{mpp}}(\text{w})}{\text{Surface}(\text{m}^2) \times 10}$$

### Exemple :

Un panneau de 1.6 m<sup>2</sup>, de 300 Wc de puissance a un rendement de :

$$R = \frac{(300/1.6)}{10} = 18.75\%$$

Les caractéristiques secondaires : Nous avons qualifié ces données de secondaires car elles interviendront dans un second temps dans votre travail de dimensionnement. Elles vous seront en effet utiles pour le dimensionnement des autres éléments de votre installation, dont le dimensionnement de l'onduleur

- **V<sub>mpp</sub>** : tension correspondante à P<sub>mpp</sub>
- **I<sub>mpp</sub>** : intensité correspondante à P<sub>mpp</sub>
- **V<sub>oc</sub>** : tension en circuit ouvert (= tension maximale que peut générer le panneau)
- **I<sub>cc</sub> (I<sub>sc</sub> en anglais)** : intensité en court-circuit (= intensité maximale que peut générer le panneau)
- **Coeff. /T°** : influence d'un écart de température par rapport à la T° STC, soit 25°C, exprimée en %/°C.
- **Tolérance rendement** : elle indique la tolérance admise pour le rendement du module. En fait les cellules n'ont pas toutes exactement le même rendement car le silicium cristallin dont elles sont issues n'est pas absolument uniforme avant d'être découpé en Wafer. Par conséquent en bout de chaîne d'assemblage les panneaux photovoltaïques n'ont pas

exactement le même rendement au 10ème de % près. Les tolérances sont comprises dans la fourchette -5% à 5%.

Par exemple si vous achetez 10 unités d'un même modèle de modules photovoltaïques annoncés à 300Wc avec une tolérance rendement de 0-5%, la puissance de chacun des panneaux pris individuellement sera comprise entre 300 et 315Wc la première année.

## **I.10 Les garanties :**

Chaque fabricant de panneaux solaires photovoltaïques fournit, en plus des garanties légales, 2 garanties contractuelles.

### **I.10.1 Une garantie produite:**

Elle concerne les constituants non producteurs d'électricité comme le verre, le cadre, la boîte de jonction, ... et garantie contre la détérioration de ces matériaux

### **I.10.2 Une garantie sur la puissance :**

Elle garantit l'évolution du rendement des cellules photovoltaïques constituant le panneau au fil des années. Par exemple une « garantie de 80% de puissance à 25 ans » pour un panneau de 300Wc signifie que le fournisseur garantit que la puissance du panneau ne sera pas inférieure à  $300Wc \times 80\% = 260Wc$  après 25ans.

Attention à ne pas confondre garantie et durée de vie. En effet la durée de vie est généralement bien plus importante que la garantie produit. Cela vaut aussi pour les autres constituants comme les onduleurs.

## **I.11 L'impact environnemental :**

Les 2 composantes principales relatives à l'impact environnemental de la fabrication d'un panneau photovoltaïque sont :

- Le temps de retour énergétique : temps nécessaire pour qu'un panneau produise la quantité d'énergie qu'il a nécessité pour sa production
- L'émission de CO<sup>2</sup> résultant de son processus de fabrication

Différentes études indiquent que l'énergie nécessaire pour réaliser un panneau photovoltaïque est d'environ 2 500 kWh / kWc. Sachant que la production moyenne d'un

panneau est en France de 1000 kWh / kWc, le temps de retour énergétique se situe donc aux alentours de 2,5 ans.

Par ailleurs, d'après le « Product Environmental Footprint Category Rules », recueil de règles propres aux panneaux photovoltaïques validé par la commission européenne en 2018, l'émission de CO<sub>2</sub> a été estimée pour les panneaux photovoltaïques à base de silicium cristallin entre 48,8 CO<sub>2</sub>-eq/kWh (silicium polycristallin) et 80,4 CO<sub>2</sub>-eq/kWh (silicium monocristallin).

### **I.12 La maintenance:**

Un panneau solaire photovoltaïque ne nécessite que très peu de maintenance régulière. La seule chose à réaliser régulièrement, c'est de s'assurer que les panneaux ne sont pas sales (poussière, défections d'oiseaux, feuilles mortes, ...)

En effet, un simple encrassement des panneaux peut être à l'origine d'une baisse de 5% de leur rendement. La présence de feuilles mortes ou autre corps étranger peut générer une ombre qui peut avoir des conséquences plus importantes sur la performance des panneaux comme nous l'avons vu précédemment.

### **I.13 Principe de fonctionnement :**

Le fonctionnement des cellules PV repose sur un effet physique appelé :

L'effet photovoltaïque, qui se traduit par la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu cc). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ( $h\nu$ ), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ( $E_g = E_C - E_V$ ), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron- trou dans différents points de la jonction.

Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires.

**Caractéristique courant-tension ;** Le courant de court-circuit est  $I_{cc}=7.5A$ , c'est le courant maximal que la cellule peut fournir. La tension de circuit ouvert est  $V_{oc} =21.5V$ . Ce résultat peut être expliqué par le fait que le générateur est composé de 35 cellules connectées en série ce qui

donne:  $V_{oc} = 35 * 0.6 = 21V$ ., on a représenté la caractéristique courant-tension du module PV dans les conditions standard « STC » [ $G=1000w /m^2$  et  $T=25^{\circ}C$ ]

### **I.13.1 Les critères influant sur le rendement de module PV :**

Pour que le module photovoltaïque garde toujours un rendement élevé, plusieurs paramètres entres en jeux et perturbe son fiabilité ou l'inverse, en peut classer ces critères en deux :

#### **I.13.1.1 Critères atmosphériques :**

Ces critères sont imposés généralement par les conditions climatiques et dépendent principalement de l'atmosphère et les lieux des installations, on peut citer plusieurs paramètres tel que l'éclairement, la température, la vitesse du vent, la présence de poussières ...etc.

#### **I.13.1.2 L'éclairement:**

D'après la formule (I.2), on constate que le rendement dépend de l'éclairement, ce facteur est variable le long de la journée et ne peut agir pour l'augmenter, la meilleure solution est de choisir un endroit de fort ensoleillement pour exposer les modules.

#### **I.13.1.3 La température de fonctionnement:**

L'augmentation de la température influe directement sur le comportement de la photopile, elle engendre la diminution de la tension de l'ordre de 2 mV par degré, cette augmentation se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible, donc, sur le rendement de la cellule.

### **I.13.2 L'utilisation des régulateurs de charge:**

Afin d'améliorer les performances des modules photovoltaïque et d'assurer une meilleure durée de vie, il est primordial d'installer les régulateurs de charge, tel que de type série, shunt, PWM, MPPT.

## **I.14 Les différents types du système PV:**

Les systèmes PV sont composés selon les exigences en trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride :

### **I.14.1 Systems autonomes:**

Une installation photovoltaïque (PV) est dite autonome – ou isolée – quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système PV autonome permet de fournir du courant

électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Donc l'énergie produite est utilisée immédiatement (pompage, l'éclairage, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée.

Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques [7].

Les performances des systèmes autonomes reviennent surtout sur l'état des batteries, c'est l'élément de base dans ces types de systèmes.

#### **I.14.2 Systèmes hybrides :**

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui 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. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés [8].

#### **I.15 Association des cellules PV :**

La puissance produite par la cellule photovoltaïque élémentaire est très faible par rapport aux besoins des applications domestiques ou industrielles. Pour satisfaire les besoins des charges couramment utilisées, il faut envisager un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques soit en série soit en parallèle. Cet assemblage forme ce qu'on appelle « Module photovoltaïque ».

##### **I.15.1 Association série :**

Pour un groupement en série de  $N_s$  cellules, la tension résultante est la somme des tensions de toutes cellules, tandis que le courant de sortie maintient sa valeur :

$$U_{N_s} = U_{i1} + U_{i2} + \dots + U_{iN_s} = N_s * U_{i1} \text{ et } I_{N_s} = I_{i1}$$

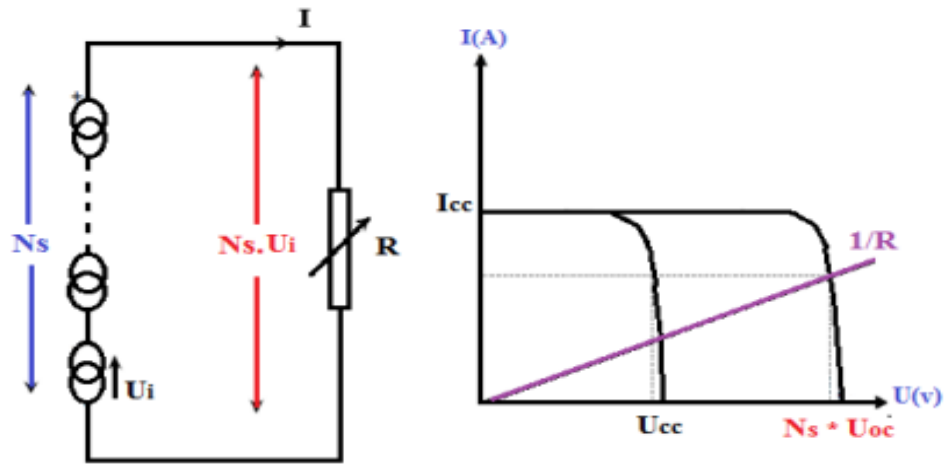


Figure I.11: Association série des cellules PV

**I.15.2 Connexion en parallèle :**

Pour un groupement en parallèle de  $N_p$  cellules, on obtient à la sortie un courant égal à la somme de tous les courants des branches, avec une tension égale à celle d'une seule cellule :

$$I_{Np} = I_{i1} + I_{i2} + \dots + I_{iNp} = Np * I_i \text{ et } U_{Np} = U_i$$

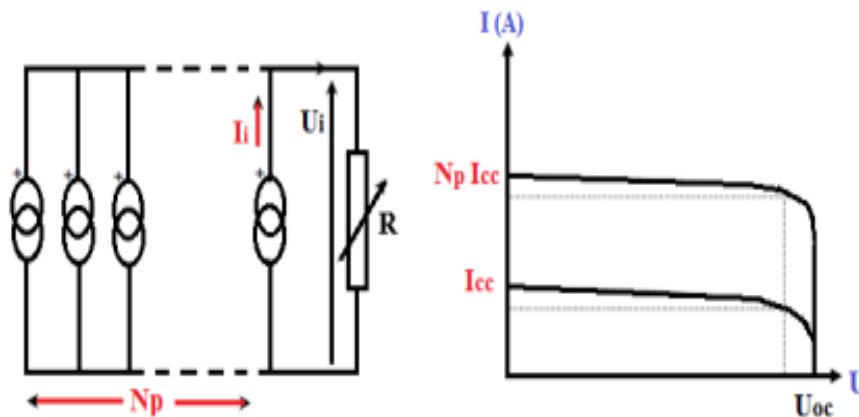


Figure I.12: Association parallèle des cellules PV

**I.15.3 Association mixte (hybride):**

Dans une association en série/parallèle, le courant s'ajoute proportionnellement au nombre des cellules en série et la tension s'ajoute proportionnellement au nombre des cellules en parallèle [3].

$$U_{Np} = U_i \quad \text{et} \quad I_{Ns} = I_i$$

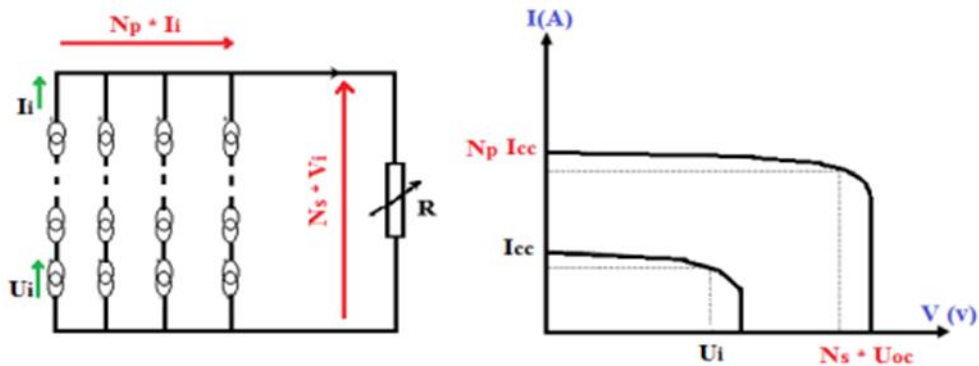


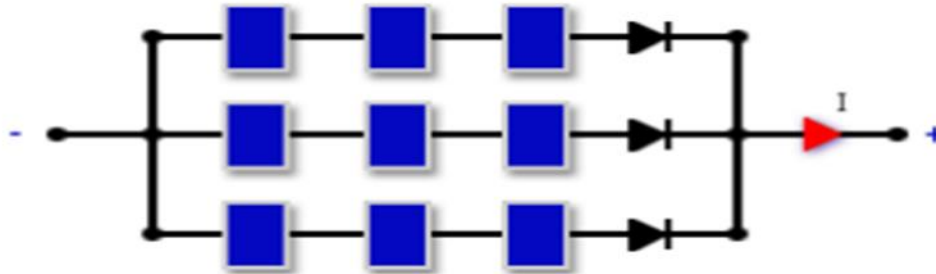
Figure I.13 : Association mixte des cellules PV

## I.16 Protection des cellules PV :

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années, il est donc indispensable d'ajouter des protections électriques aux modules pour éviter les pannes le plus dangereuses. Généralement, deux types de diodes de protections sont placés dans les installations PV, [9] .

### I.16.1 La diode de blockage:

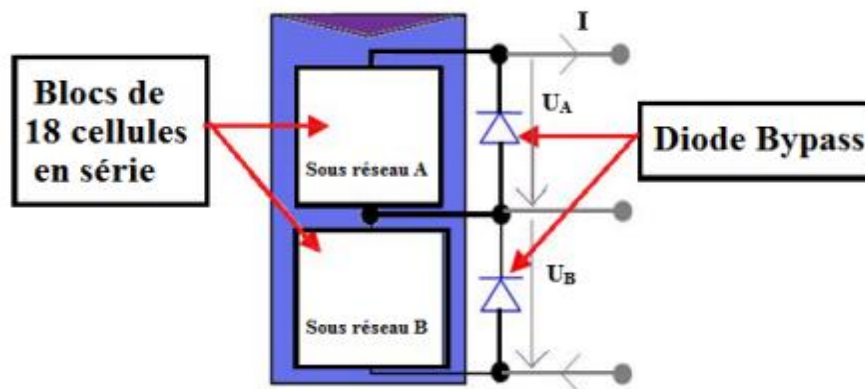
Les diodes de blocage sont utilisées dans des panneaux photovoltaïques quand il y a deux ou plusieurs branches parallèles où chaque branche contient ensemble des cellules connectées en série [10] Invalid source specified.. Leur rôle est d'assurer un seul sens de circulation de courant électrique qui va de la source PV vers la charge connectée en série avec le PV. Ils sont aussi appelés les diodes séries, les diodes d'isolements ou encore les diodes anti-retours.



**Figure I.14 :** Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode anti-retour [7].

### I.16.2 La diode by-pass :

Les diodes de by-pass permettant d'éviter les problèmes liés à l'ombrage [11]. Quand il y a des cellules solaires qui produisent moins d'énergie, le courant qui doit traverser ces cellules est détourné par la diode by-pass [12] Ainsi, le panneau est protégé quand il y a de l'ombre sur une partie [13].

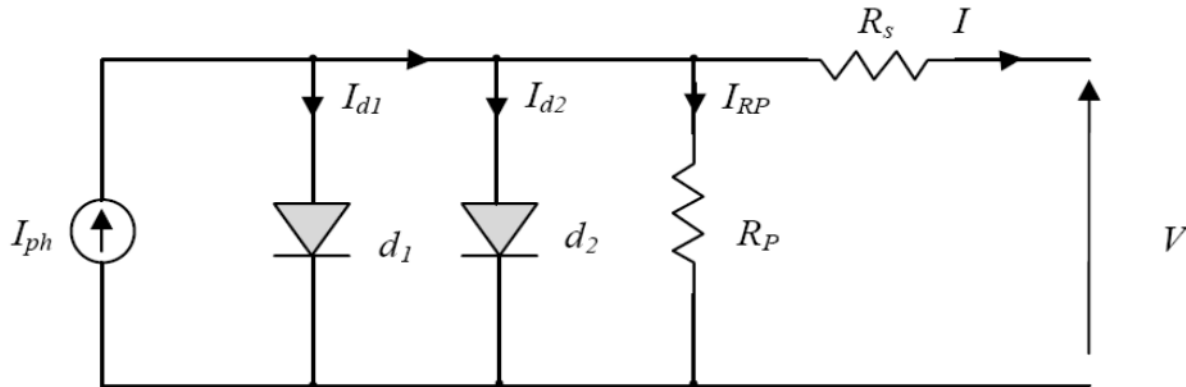


**Figure I.15:** Protection de cellule solaire dans un module PV par la diode by-pass [5].

### I.17 Modèle électrique d'une cellule PV :

Dans la littérature, il Ya beaucoup de modèles qui caractérisent l'effet de la cellule photovoltaïque. Dans cette étude on a choisi le modèle électrique le plus proche du générateur photovoltaïque, qui est le modèle à deux diodes (double exponentielle) où la cellule est présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par Deux diodes en parallèles. Et pour tenir compte des phénomènes physiques

au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances : série  $R_s$  et shunt ou parallèle  $R_p$  comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure (18)



**Figure I 16:** Modèle électrique de la cellule

Le courant  $I_{ph}$  est dû au déplacement sous l'effet du champ électrique dans la zone de déplétion des paires électrons-trous créées dans cette zone de déplétion par le rayonnement (l'éclairement). Les trous (électrons) sont déplacés vers le semi-conducteur de type P (N).

### I.18 Régulateur de charge / décharge :

Les installations solaires photovoltaïques sont pratiquement toujours équipées par des batteries au plomb, pour stocker l'électricité solaire. Ces batteries doivent impérativement être protégées contre les surcharges et les décharges profondes, aussi est nécessaire d'y adjoindre un régulateur.

Sa fonction principale est de contrôler l'état de la batterie. Il autorise la charge complète de celle-ci en éliminant tout risque de surcharge et interrompt l'alimentation des destinataires si l'état de charge de la batterie devient inférieur au seuil de déclenchement de la sécurité anti décharge profonde. Prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie qui est le seul composant fragile du système

Photovoltaïque. Il existe deux types de régulateur de batterie, série et parallèle (Figure 0.5).

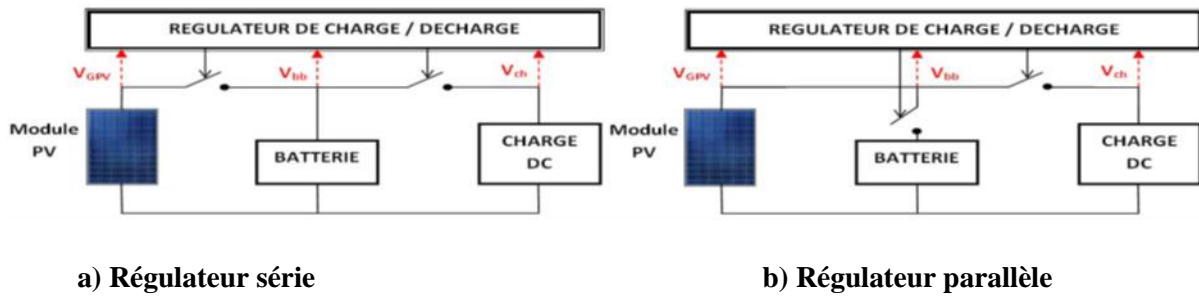


Figure I.17: Les deux types de régulateurs de batterie

### I.19 Les Avantages spécifiques du photovoltaïque :

Par rapport aux autres sources renouvelables, le photovoltaïque offre des avantages particuliers

- Elle est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.
- L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- Il est totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.
- Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte (facteurs atmosphériques ou liquides, produits de nettoyage, risque d'accident physique,) aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est une énergie purement propre et écologique.
- La maintenance et les réparations sont réduites à presque rien pour la partie photovoltaïque et à peu de chose pour l'électronique associée.

### Conclusion

Dans cette partie, nous avons expliqué le principe de la conversion solaire et l'effet photovoltaïque, ensuite nous avons cité les différents types de cellules PV les plus utilisées dans les installations de production d'électricité. Enfin, nous avons présenté rapidement les paramètres qui caractérisent la cellule et ainsi qu'ont utilisés pour la simulation du système solaire.

## Chapitre II :

*Modélisation et simulation d'un système*

*PV*

## Introduction

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque complet sous l'environnement MATLAB/Simulink. Nous avons commencé par analyser les composants des panneaux solaires, leurs différents types ainsi que leur modélisation mathématique et leur représentation dans Simulink.

Ensuite, nous avons abordé les convertisseurs DC-DC, en particulier le convertisseur BOOST, en présentant les concepts de base et les équations nécessaires pour modéliser son comportement. Nous avons également mis en œuvre des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT), en nous concentrant sur les méthodes les plus courantes telles que Perturb and Observe (P&O) et la conductance incrémentale (InCond).

L'intégration de ces techniques dans le système PV a permis d'améliorer considérablement l'efficacité de conversion de l'énergie solaire, en assurant une extraction maximale de la puissance disponible, même en cas de variations d'ensoleillement et de température. Les résultats de simulation ont confirmé la pertinence de ces approches dans les systèmes photovoltaïques à grande échelle.

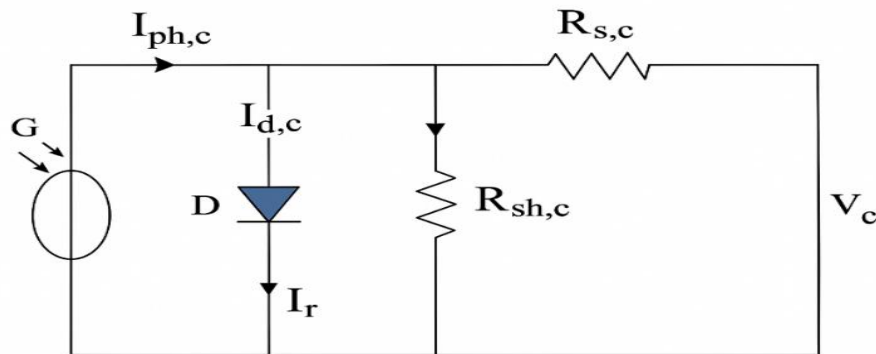
## Chapitre II : Modélisation et simulation d'un système PV

### II.1 Modèle mathématique et formulation:

Les systèmes photovoltaïques reposent sur la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de cellules solaires. Pour comprendre et analyser avec précision les performances de ces systèmes, des modèles mathématiques sont utilisés qui décrivent le comportement des cellules solaires en fonction de variables physiques telles que le courant, la tension, le rayonnement solaire et la température.

#### II.1.1 Modèle réel à une diode d'une cellule photovoltaïque:

Le schéma de cellule solaire équivalent illustrer dans la figure II .1. Est représenté par une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance parallèle (montée)



**Figure II.1 :** Schéma équivalent d'une cellule PV avec une diode

Le courant de sortie généré par la cellule photovoltaïque peut être décrit par l'expression mathématique suivante :

$$I_c = I_{ph,c} - I_{d,c} - I_r \quad (II.1)$$

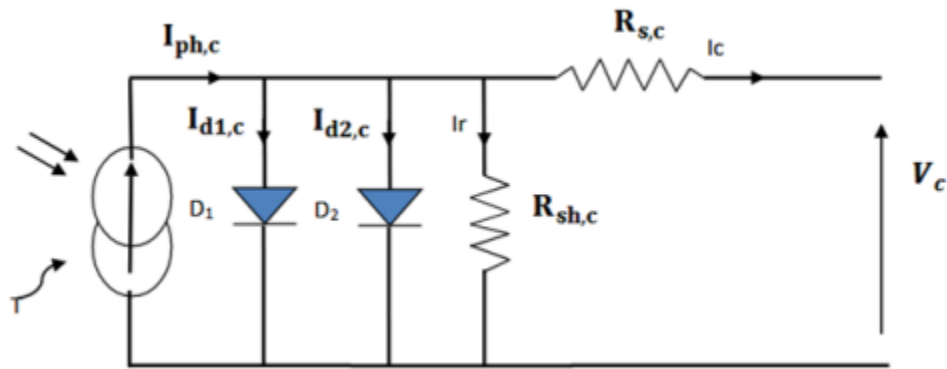
$$I_c = I_{ph,c} - I_{0c} \left( \exp \frac{q(V_c + R_{s,c} I_c)}{nkt} - 1 \right) - \frac{(V_c + R_{s,c} I_c)}{R_{sh,c}} \quad (II.2)$$

Dans cette équation, représente  $I_{ph,c}$  Photo courant généré à l'intérieur de la cellule photovoltaïque En pointant  $I_{0c}$  Au courant de saturation inverse de la diode connectée à la cellule.

Symboles  $q$ ,  $n$ ,  $K$  et  $T$  Comme la charge électronique, le facteur de qualité (ou facteur d'idéalité) de la diode, Constante de Boltzmann, température de la cellule. La tension aux bornes de la cellule est symbolisée par  $V_c$  Alors qu'il représente  $I$  Le courant généré par la cellule Enfin, signalez,  $R_{s,c}$  et  $R_{sh,c}$  À la fois à la résistance série et parallèle de la cellule. [14]

**II.1.2 Modèle à deux diodes :**

Le modèle de diode (modèle à double exposant) est actuellement considéré comme le modèle électrique le plus précis pour représenter la cellule photovoltaïque. Dans ce modèle, la cellule est représentée comme une source de courant idéale connectée en parallèle avec deux diodes, afin de simuler les phénomènes physiques complexes au sein de la cellule. Pour obtenir une représentation plus réaliste, le modèle est complété par l'ajout d'une résistance série.  $R_s$  Les pertes ohmiques représentent, Et une résistance parallèle  $R_{sh}$ , Simule les chemins de fuite, comme indiqué dans le schéma électrique équivalent de la figure. II.2 [14].



**Figure II.2 :** Modèle à deux diodes d'une cellule PV

En effectuant des calculs mathématiques et des développements analytiques complexes, ce modèle fournit un courant similaire à celui généré par une cellule photovoltaïque (PV), conformément à la relation suivante :

$$I_c = I_{ph,c} - I_{d1,c} - I_{d2,c} - I_r \tag{II.3}$$

Par conséquent, le courant peut être exprimé comme suit:

$$I_c = I_{ph,c} - I_{01,c} \left( \exp \frac{q(V_c + R_{s,c} \times I_c)}{n_1 k T} - 1 \right) - I_{02,c} \left( \exp \frac{q(V_c + R_{s,c} \times I_c)}{n_2 k T} - 1 \right) - \frac{V_c + R_{s,c} \times I_c}{R_{sh,c}} \tag{II.4}$$

Dans cette équation :

$I_{ph,c}$  : représente le photo-courant d'une cellule

$I_{0c}$  : représente le courant de saturation inverse de la diode d'une cellule

$Q$  : représente la charge de l'électron représente le facteur d'idéalité de la diode

$K$  : représente la Constante de Boltzmann

$T$  : représente la température de la cellule

$VC$  : représente la tension aux bornes de la cellule

$I_c$  : représente le courant de la cellule

$R_{S,c}$  : représente les résistances série de la cellule

$R_{sh,c}$  : représente les résistances Caractéristiques d'un module shunt de la cellule [14].

### II.1.3 Caractéristiques d'un module :

- Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangulaires solides et minces, d'une épaisseur de seulement quelques centimètres, présentant les caractéristiques suivantes :

- Puissance de crête ( $P_c$ ) : Mesurée en watt-crête, elle représente la puissance électrique maximale que l'appareil peut produire dans des conditions standard, à savoir une température de 25°C et un rayonnement solaire de 1000 W/m<sup>2</sup>.

- Caractéristique  $I = f(V)$  : C'est une courbe qui montre la relation entre le courant électrique ( $I$ ) produit par l'unité et la tension électrique ( $V$ ) à ses extrémités.

- Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) : tension électrique aux bornes de l'unité lorsqu'aucun courant électrique ne circule (c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de charge). Sous un éclairage puissant équivalent à la « pleine lumière du soleil », le module produit une tension continue d'environ 0,6 volt. Idéalement, cette valeur est légèrement inférieure à celle-là :

$$V_{oc} = \left( \frac{q}{nkt} \right) + \ln \left( \frac{I_l}{I_0} - 1 \right) \quad (II.5)$$

• Courant de court-circuit  $I_{cc}$ : Courant débité par un module en court-circuit pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. L'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I_{cc} = \frac{I_l}{1 + \left(\frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (\text{II.6})$$

• Le point de fonctionnement optimal ( $P_m$ ) est la condition dans laquelle la puissance de sortie d'une cellule solaire atteint sa valeur maximale possible sous une irradiation solaire complète. Cette puissance maximale est connue sous le nom de point de puissance maximale et est calculée à partir de la relation:

$$P_m = V_m \times I_m \quad (\text{II.7})$$

• Rendement: Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente, il est exprimé en (%). Soit (S) la surface du module et (E) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\eta = \frac{p_m}{S \times E} \quad (\text{II.8})$$

• Facteur de forme : Rapport entre la puissance maximale et la puissance optimale  $P_m$  que peut avoir la cellule:

$$FF = \frac{p_m}{v_{oc} \times I_{cc}} \quad (\text{II.9})$$

II.1.4 Simulation d'un système de panneaux solaires :

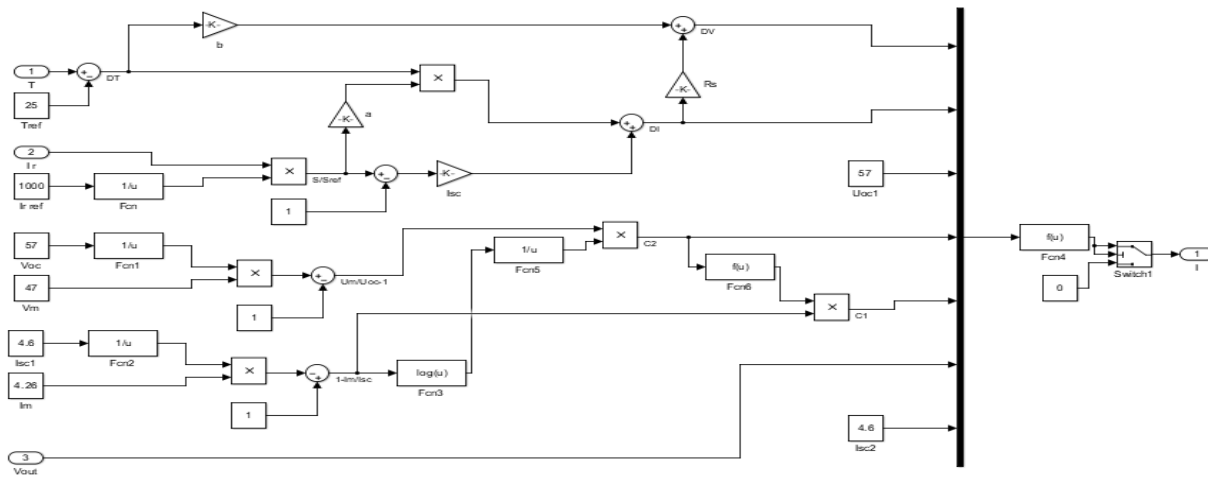


Figure II.3 : model panneaux solaires sur MATLAB

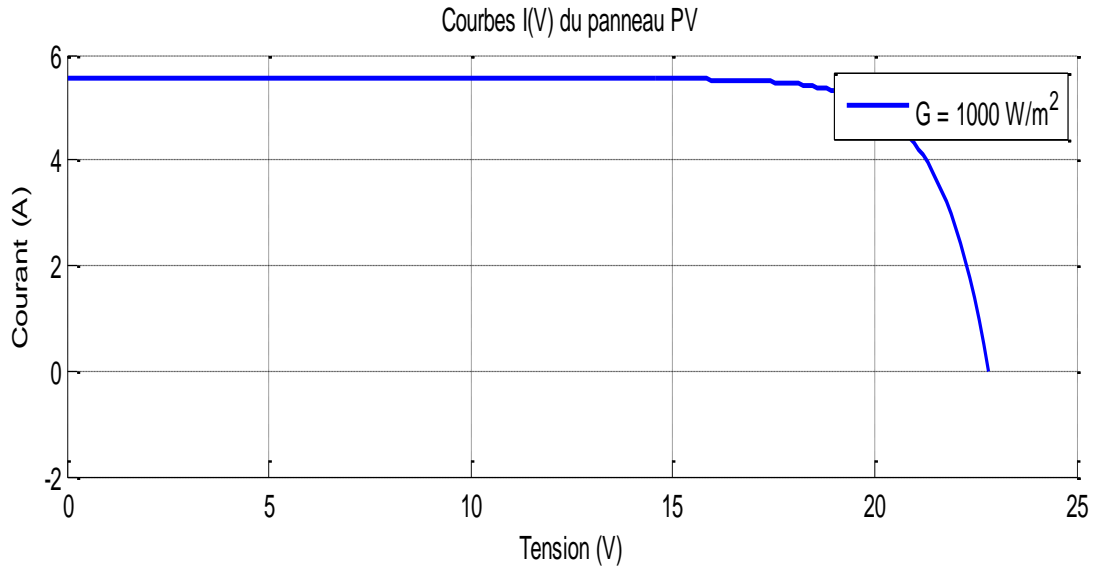
II.1.5 Modélisation Du Module PV :

Un module solaire poly cristallin de 200 W composés de 144 cellules demi-coupées a été sélectionné à des fins de modélisation. Les spécifications détaillées sont présentées dans le tableau II.1.

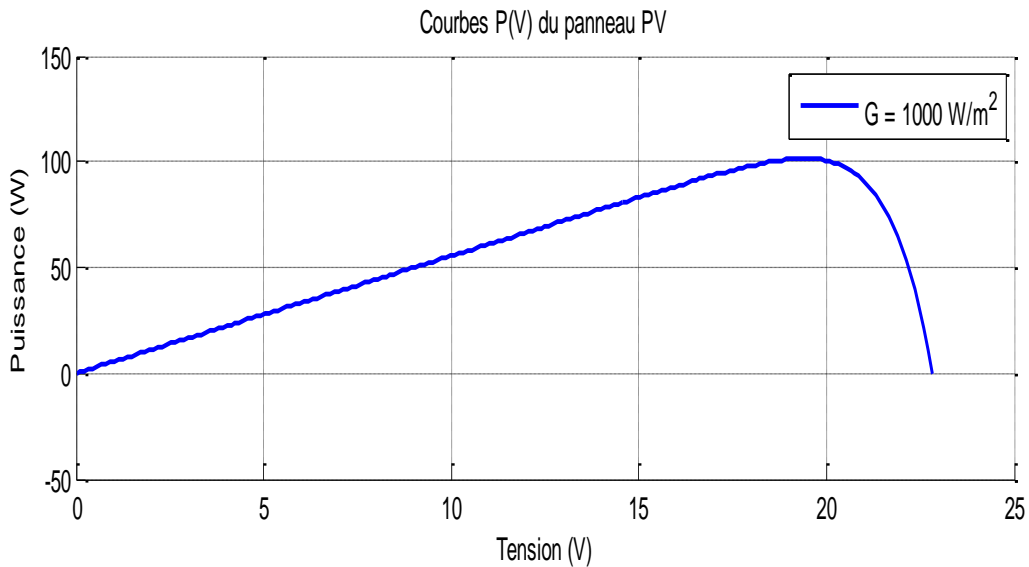
<b>P<sub>max</sub></b>	<b>V<sub>mp</sub></b>	<b>I<sub>mp</sub></b>	<b>T</b>	<b>G</b>	<b>V<sub>oc</sub></b>	<b>I<sub>sc</sub></b>
<b>200 watts</b>	<b>47</b>	<b>4.26</b>	<b>25 c°</b>	<b>1000W/m2</b>	<b>57</b>	<b>4.6</b>

Table II.1 : Caractéristiques électriques du module PV

Nous allons examiner le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions mentionnées dans le tableau II.1 .



**Figure II.4 :** Caractéristique courant-V d'une module PV



**Figure II.5 :** Caractéristique P-V d'un module PV

La simulation réalisée dans Simulink représente un modèle mathématique d'un panneau photovoltaïque (PV) basé sur le modèle à une diode. Elle permet de simuler le comportement électrique du panneau en fonction de l'irradiance solaire, de la température, et des paramètres caractéristiques de la cellule PV ( $I_{sc}$ ,  $V_{OC}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$ ).

Ce modèle est essentiel pour :

- Comprendre la variation du courant et de la tension en fonction des conditions climatiques.
- Évaluer les performances d'un panneau solaire en temps réel.
- Servir de base solide pour intégrer une technique MPPT (suivi du point de puissance maximale), comme Perturba and Observe (P&O).

La simulation est donc une étape cruciale pour optimiser la production d'énergie solaire dans un système photovoltaïque.

## II.2 Les convertisseurs :

### II.2.1 Principe de fonctionnement d'un hacheur Boost:

La figure II.6 représente la structure de base de ce convertisseur

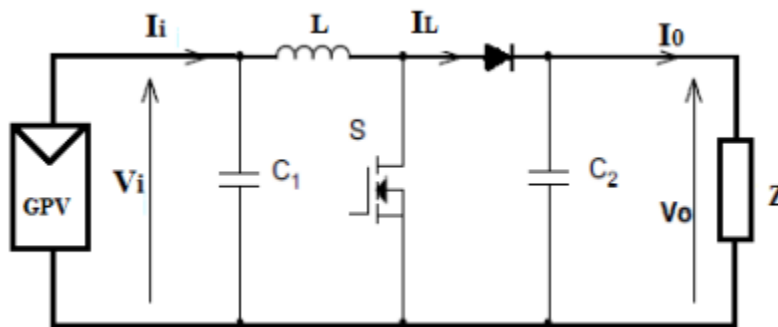
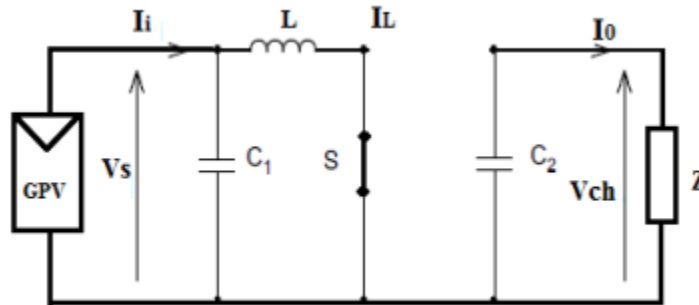


Figure II.6 : schéma de montage d'un hacheur Boost

Le convertisseur boost est largement utilisé pour suivre le point de puissance maximale (MPP) dans les générateurs photovoltaïques. Ce convertisseur peut fonctionner en mode continu ou non continu.

En mode de conduction continue, le convertisseur Boost fonctionne en deux étapes principales, liées à l'état de l'interrupteur électronique commandable S. [18]

Lorsque l'interrupteur S est fermé, il devient conducteur et agit comme un conducteur idéal, formant deux circuits : un côté source et un côté charge. Dans ce cas, le courant traversant la bobine augmente, ce qui entraîne le stockage de l'énergie sous la forme d'un champ magnétique. La diode est dans un état de blocage, déconnectant ainsi la charge de la source.



**Figure II.7 :** schéma de montage GPV-Boost-Charge avec S fermée

La tension aux bornes de l'inductance est :

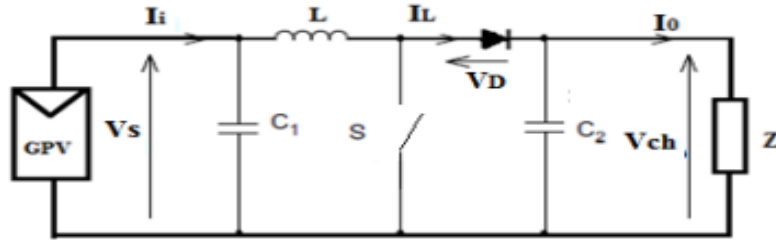
$$V_l = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.10})$$

La tension du panneau PV est égale à celle aux bornes de l'inductance :

$$V_s = V_l = L \frac{dI_L}{dt} \approx L \frac{\Delta I_L}{\Delta t_{\text{ont}}} = L \frac{\Delta I_L}{T_{\text{on}}} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Ce qui donne : } \Delta I_L = \frac{V_s \times T_{\text{on}}}{L} \quad (\text{II.12})$$

Lorsque le disjoncteur S s'ouvre, la bobine décharge l'énergie qu'elle a stockée lors de la première étape. Cette énergie est transmise à travers la diode vers la charge, spécifiquement pour charger le condensateur connecté en parallèle avec la charge. Comme la bobine est connectée en série avec le générateur, la tension générée par la bobine s'ajoute à la tension du générateur, et c'est ce qu'on appelle le phénomène d'augmentation de tension (ou effet d'élévation de tension - Survolteur). Pour maintenir un système de conduction continu, une fréquence de hachage élevée doit être utilisée, ce qui nécessite un commutateur électronique rapide tel qu'un transistor ou un IGBT.



**Figure II.8 :** schéma de montage GPV-Boost-Charge avec S ouverte

$$\text{A partir de cette maille on peut écrire : } V_h = V_s - L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.13})$$

Et comme le courant dans la bobine est en diminution, la quantité :  $\frac{dI_L}{dt} < 0$  ce qui donne

$$V_h = V_s - (-L \frac{dI_L}{dt}) = V_s + L \frac{dI_L}{dt} = V_s + L \frac{\Delta I_L}{\Delta T_{oof}} \quad (\text{II.14})$$

On remplace l'équation (II.12) dans (II.14) on obtient :

$$V_h = V_s + L \frac{V_s \times T_{on}}{T_{oof} L} = V_s + \frac{V_s \times T_{on}}{T_{oof}} = V_s \left(1 + \frac{T_{on}}{T_{oof}}\right) = V_s \left(\frac{T_{on} + T_{oof}}{T_{oof}}\right) = V_s \left(\frac{T}{T - T_{on}}\right) = V_s \left(\frac{T/T}{T - T_{on}/T}\right)$$

$$V_h = V_s \left(\frac{1}{1-D}\right) \quad (\text{II.15})$$

D représente le rapport cyclique, qui est le rapport exprimant la partie de la période de temps T pendant laquelle le commutateur S est dans l'état conducteur (fermé).

La valeur de ce paramètre est toujours comprise entre 0 et 1, c'est-à-dire :  $0 < D < 1$

Ce paramètre est un élément essentiel dans l'analyse et le contrôle des circuits électroniques, en particulier dans les systèmes de découpage de tension (tels que les convertisseurs DC-DC), où la tension de sortie peut être contrôlée en ajustant la valeur de D.

## II.2.2 Types de convertisseurs DC-DC :

Trois types d'hacheurs seront étudiés dans ce chapitre : hacheur abaisseur élévateur de tension (Buck-Boost), hacheur dévolteur ou abaisseur de tension (Buck), et hacheur survolteur ou élévateur de tension (Boost). Dans notre étude on s'intéresse beaucoup plus aux hacheurs de type BOOST [23]

L'hacheur est un convertisseur continu/continu qui permet de transformer une énergie continue d'un certain niveau de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation est indispensable, notamment pour le stockage de l'énergie photovoltaïque dans des batteries ou pour l'alimentation de charges continues.

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC, parmi lesquels on distingue :

- ✓ Le convertisseur Buck (hacheur série),
- ✓ Le convertisseur Boost (hacheur parallèle),
- ✓ Le convertisseur Buck-Boost (hacheur série-parallèle).

La topologie Buck est généralement utilisée pour abaisser la tension. Dans les applications photovoltaïques, ce type de convertisseur est souvent employé comme chargeur de batteries ou dans les systèmes de pompage d'eau.

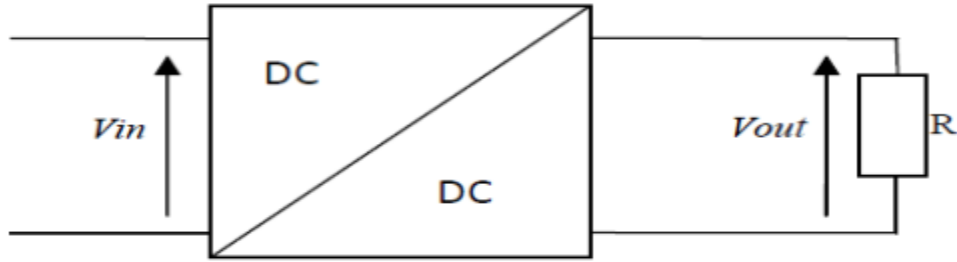
La topologie Boost, quant à elle, est utilisée pour élever la tension. Dans les systèmes de production d'énergie, un convertisseur Boost sert à augmenter la tension de sortie du panneau photovoltaïque avant l'étage de l'onduleur. Il existe également des topologies capables à la fois d'augmenter et de diminuer la tension, comme le Buck-Boost. Les convertisseurs DC-DC peuvent être considérés comme des transformateurs fonctionnant en courant continu. Le présent travail se concentre sur le convertisseur Boost, en raison de son rôle crucial dans l'optimisation du rendement du système photovoltaïque.

Pour modéliser avec précision le comportement réel du convertisseur Boost, une simulation s'avère nécessaire. Celle-ci permet de prendre en compte les différents composants, les pertes énergétiques, ainsi que la dynamique du convertisseur lorsqu'il fonctionne en coordination avec l'algorithme MPPT.

### **II.2.2.1 Convertisseur DC/DC :**

Les convertisseurs DC/DC sont des circuits électroniques utilisés pour convertir la tension électrique continue d'une valeur à une autre, en augmentant ou en diminuant, selon les besoins.

[19]



**Figure II 9** Convertisseur DC/DC

### II.2.2.2 Convertisseur Boost :

Le convertisseur boost, également appelé booster, (Fermé) Permet au courant alternatif de circuler à travers la bobine (L), où l'énergie est stockée sous la forme d'un champ magnétique.

A la fin de cette étape, le transistor (S) est désactivé, et la durée de vie qui résiste au changement brusque de courant alternatif est complétée, en générant une tension ajoutée à la tension source.

Cette tension de suralé tentation est augmentée par la charge (R) via la diode (D).

### II.2.3 Modèle mathématique équivalent du convertisseur :

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

Pour le premier intervalle  $\alpha T_s$  :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dv_g}{dt} = I_g - I_L \quad (\text{II.16})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = - I_0 \quad (\text{II.17})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - R_L I_L \quad (\text{II.18})$$

Pour la deuxième intervalle  $(1-\alpha) s$  :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dv_g}{dt} = I_g - I_L \quad (\text{II.19})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II.20})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - R_L I_L - V_0 \quad (\text{II.21})$$

### II.2.4 Modèle approximé du convertisseur Boost :

Le convertisseur boost passe par deux états à chaque cycle :

À la connexion ( $\alpha T_s$ )

À la coupure  $(1-\alpha) T_s$

En raison de la commutation rapide entre les deux états, nous avons besoin d'une représentation dynamique approximative.

Nous supposons donc que le changement de variables telles que le courant et la tension est linéaire, ce qui nous permet de considérer que le taux de changement est constant sur chaque période.

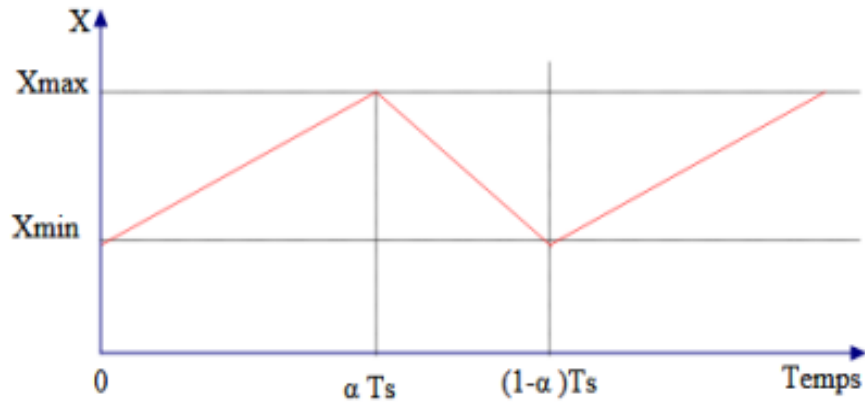
Cette simplification permet de calculer la valeur moyenne de la dérivée et de créer un modèle complet du transformateur.

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dx(\alpha T_s)} \alpha T_s + \frac{dx}{dt((1-\alpha)T_s)} (1-\alpha) T_s \quad (\text{II.22})$$

Où  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  est la valeur moyenne de la dérivée de x sur un intervalle  $T_s$ . Cette relation est valide si :

$\frac{dx}{dt(\alpha T_s)}$  et  $\frac{dx}{dt((1-\alpha)T_s)}$  sont constants sur les intervalles  $\alpha T_s$  et  $(1-\alpha) s$  respectivement. En D'autres termes, cette approximation est valable si les périodes  $\alpha T_s$  et  $(1-\alpha) s$  sont très faibles. Par rapport à la constante de temps du circuit C1Rg, C2Z et L/RL sont constants sur les intervalles  $\alpha T_s$  et  $(1-\alpha) s$  respectivement. En D'autres termes, cette approximation est valable si les périodes  $\alpha T_s$  et  $(1-\alpha) s$  sont très faibles.

Par rapport à la constante de temps du circuit C1Rg, C2Z et L/RL. [15] La capacité du condensateur varie linéairement, comme le montre la figure II.10.



**Figure II.10 :** Allure des variables dynamiques IL

En appliquant la relation (II.22) aux deux ensembles d'équations (II. (16,17, 18)) et (II. (19, 20, 21)), des équations peuvent être dérivées qui décrivent le comportement du système sur un cycle de temps complet.

$$I_{C1} = C_1 \frac{dv_g}{dt} \alpha T_s = (I_g - I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_g - I_L) \quad (\text{II.23})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dv_0}{dt} \alpha T_s = (-I_0) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_g - I_0) \quad (\text{II.24})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_g - R_L I) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_g - V_0 - R_L I_L) \quad (\text{II.25})$$

### II.2.5 Les variations des courants et des tensions du convertisseur :

Afin de réduire les fluctuations de courant et de tension sans affecter la taille du système ni augmenter son poids et son coût, les valeurs des composants du circuit, en particulier l'inductance L, doivent être soigneusement sélectionnées pour garantir que le courant admissible dans le transistor MOSFET (S) n'est pas dépassé. Cela se fait en utilisant la relation :  $V_L = L \frac{dI_L}{dt}$

En adoptant une approximation linéaire du comportement exponentiel, le taux de variation du courant IL pendant la première étape de fonctionnement (la période de conduction) peut être calculé:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} \approx \frac{V_g - R_L I_L}{L} \quad (\text{II.26})$$

À partir de la relation (II.29), l'amplitude crête à crête du courant IL est donné par :

$$I_{LCC} = 2\Delta I_L \approx \frac{(V_g - R_L I_L)}{L} \alpha T_s \quad (\text{II.27})$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour une certaine fluctuation  $\Delta I_L$  est :

$$L \approx \frac{V_g - V_0 - R_L I_L}{2\Delta I_L} \alpha T_s \quad (\text{II.28})$$

Pour le calcul des capacités C1 et C2, on a :

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{I_{C1}}{C1} = \frac{I_g - I_L}{C1} \quad (\text{II.29})$$

$$\frac{dV_0}{dt} \equiv \frac{I_{C2}}{-I_0} = \frac{-I_0}{C2} \quad (\text{II.30})$$

Les amplitudes crête à crête des tensions d'entrée et de sortie sont respectivement:

$$V_{c1cc} = 2\Delta V_{C1} = \frac{I_g - I_L}{C1} \alpha T_s \quad (\text{II.31})$$

$$V_{c2cc} = 2\Delta V_{C2} = \frac{-I_0}{C2} \alpha T_s \quad (\text{II.32})$$

Les valeurs des capacités C1 et C2 sont données respectivement par :

$$C1 = \frac{I_g - I_L}{2\Delta V_{C1}} \alpha T_s \quad (\text{II.33})$$

$$C2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{C2}} \alpha T_s \quad (\text{II.34})$$

### II.2.6 Étude en régime continue :

Le modèle continu du système est dérivé en éliminant les dérivées des variables dynamiques et en les remplaçant par leurs valeurs moyennes, ce qui donne le système d'équations présenté dans (II.26, II.27 et II.28)

$$I_L = I_g \quad (\text{II.35})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{II.36})$$

$$V_g = (1 - \alpha) V_0 \quad (\text{II.37})$$

II.2.7 Simulation d'un hacheur BOOST :

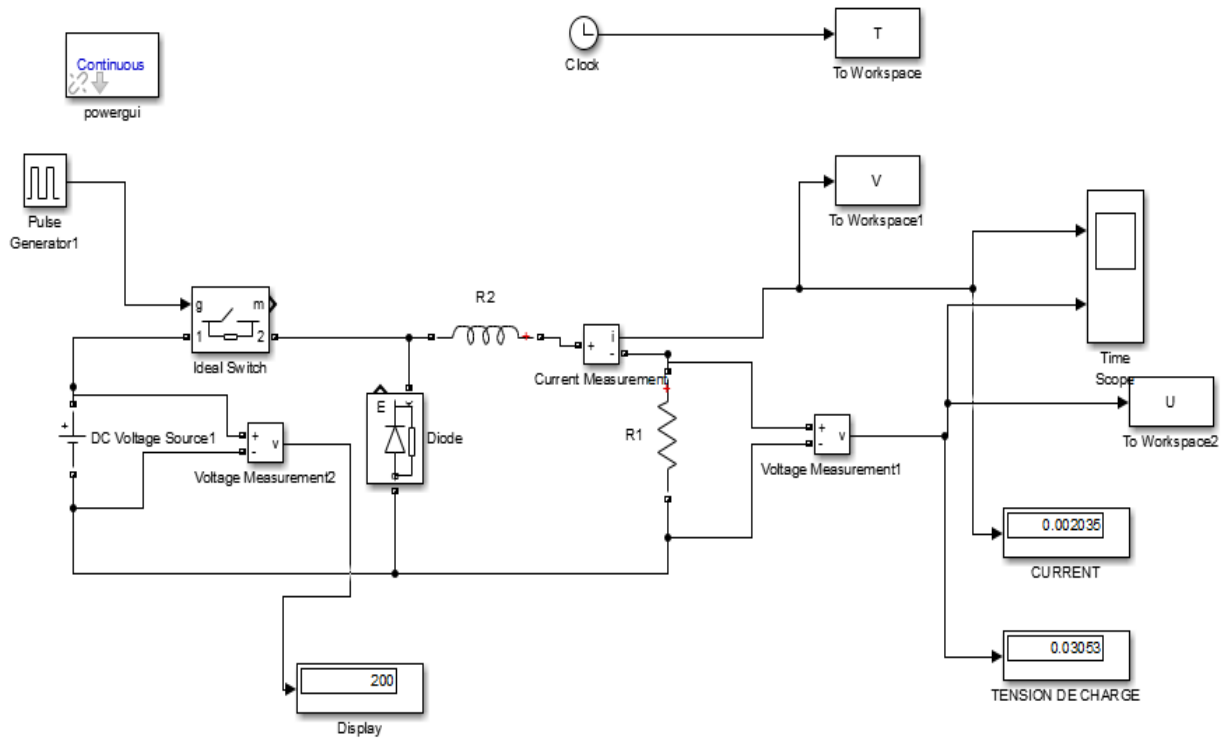
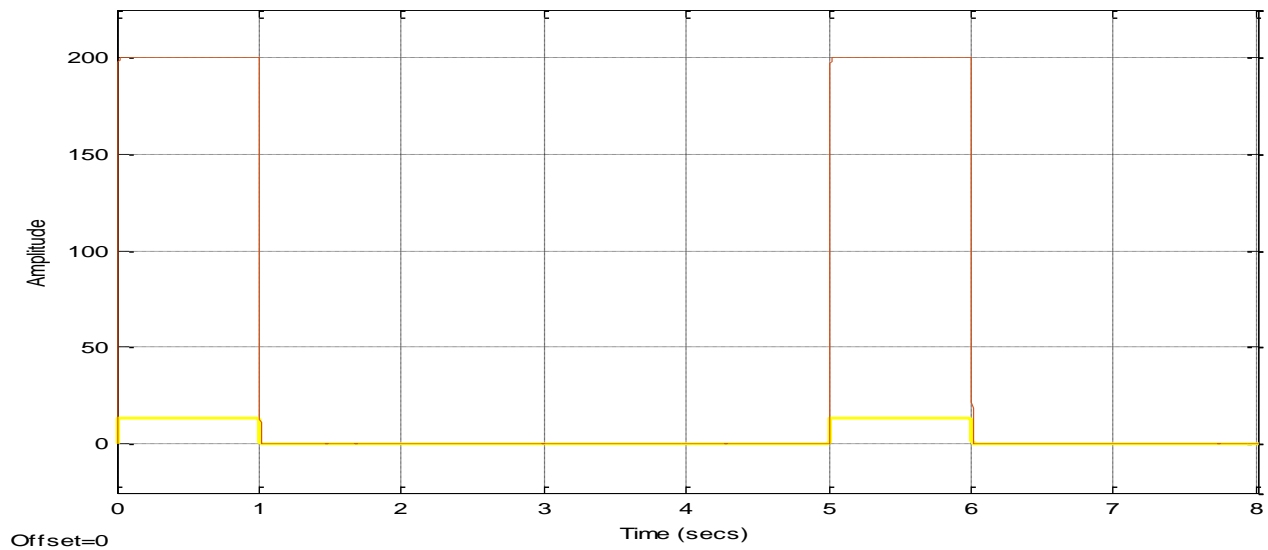


Figure II.11 : Modèle de simulation de le hacheur

Paramètre	$0(v) V$	$I_{out} (A)$	$R (\Omega)$	$(F)C$	$(H)L$
Valeurs	100	4	0.03	$e^{-3}0.5$	$e^{-3}35$

Table II.2 : Paramètres de simulation. [17]



**Figure III.12** : résultats de la simulation du hacheur au MATLAB

### II.3 La commande de la MPPT

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles. C'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissances qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie. Une caractéristique importante de ces panneaux est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé le point de puissance maximale (MPP), définie par une tension et un courant donné ; ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.). Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPPT Tracker (MPPT). Nous allons citer les différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale et en terminant par notre méthode qui est choisie parmi le précédent s'appelle 'perturbation et observation', (P&O).

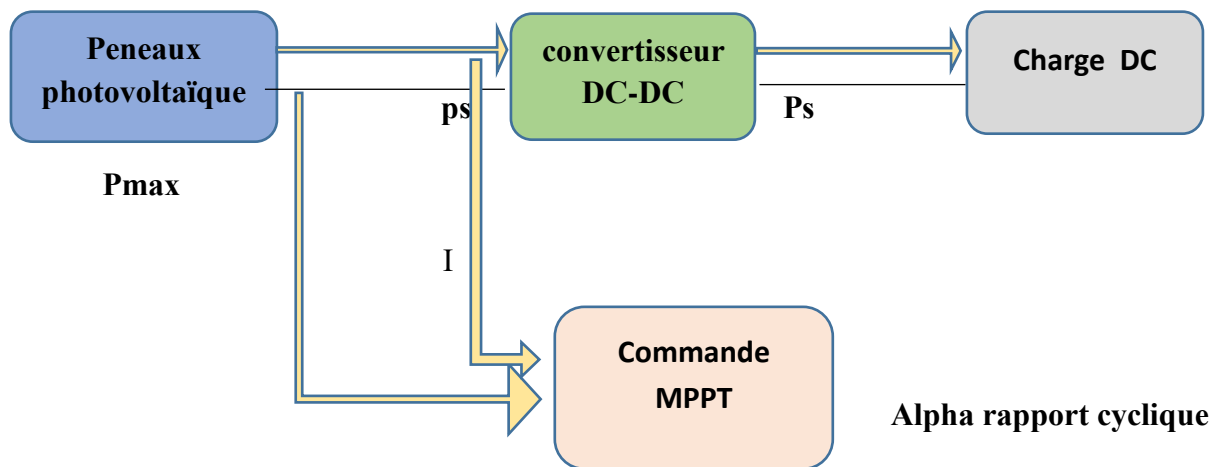
#### II.3.1 Définition de la MPPT :

Comme le nom indique, l'MPPT (Maximum Power Point Tracking en Anglais) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la

charge chaque instant. Il existe plusieurs principes de technique des commandes (MPPT) plus ou moins performantes basées sur les propriétés du générateur photovoltaïque [22]

### II.3.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal :

Cette méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. Cependant tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau. Plusieurs méthodes de poursuite du PPM ont été proposées, mais là plus en vue est le fameux algorithme P&O qui prédomine. La Figure II.13 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie associée à une commande MPPT de façon à transférer le maximum de puissance. [17]



**Figure II.13 :** Chaîne de conversion d'énergie Solaire comprenant un régulateur MPPT

### II.3.3 Classification des Commandes MPPT :

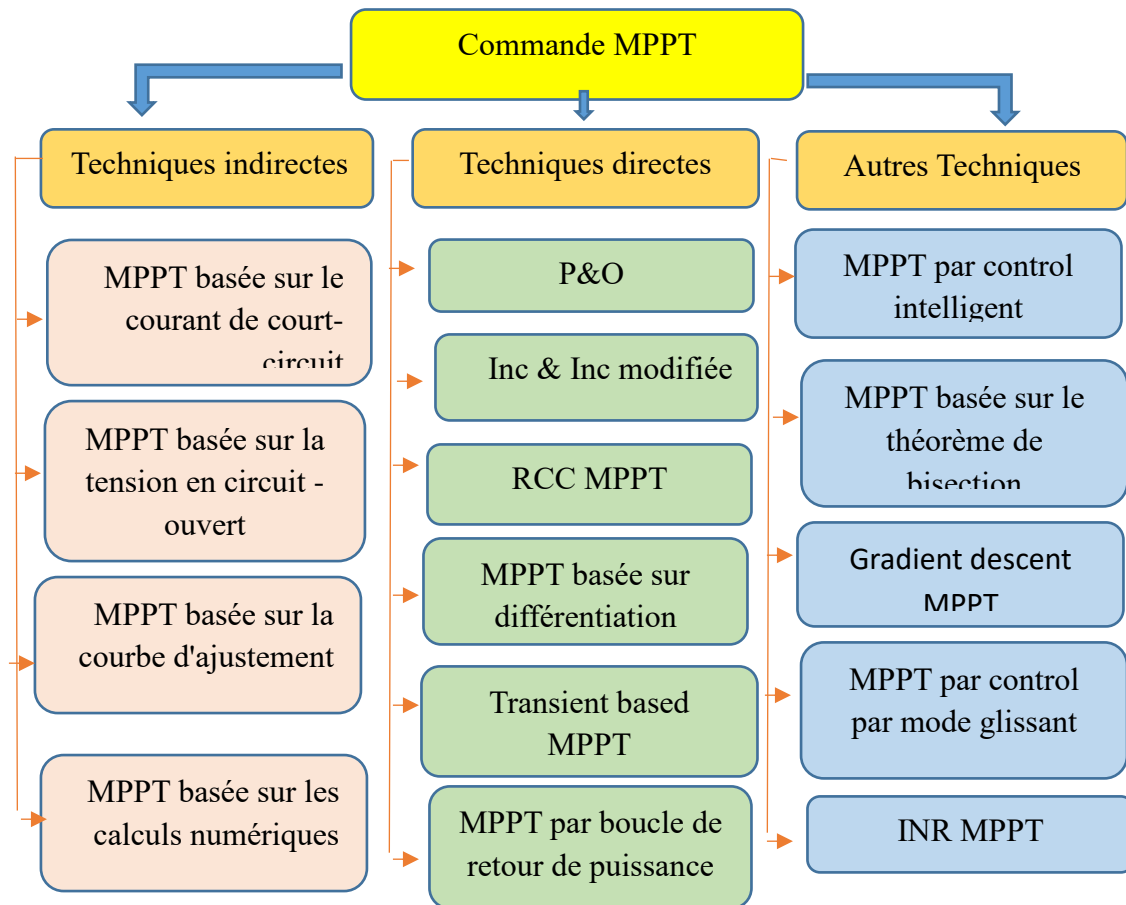
La classification peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de la commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes

### II.3.3.1 MPPT indirect :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{SC}$  ou  $V_{OC}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc... [21]

### II.3.3.2 MPPT Direct :

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 de la puissance du 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. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), l'incrément de conductance (InC)... [21]



**Figure II.14 :** Organigramme de classification des commandes MPPT

## II.4 Les algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant. [20] [21]

### II.4.1 Méthodes à contre réaction de tension :

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette

erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de

. Méthode à tension de référence fixe.

- Méthode à tension de référence en fonction de (circuit ouvert ; open circuit voltage).
- Tension de référence extrême (Cellule pilote).

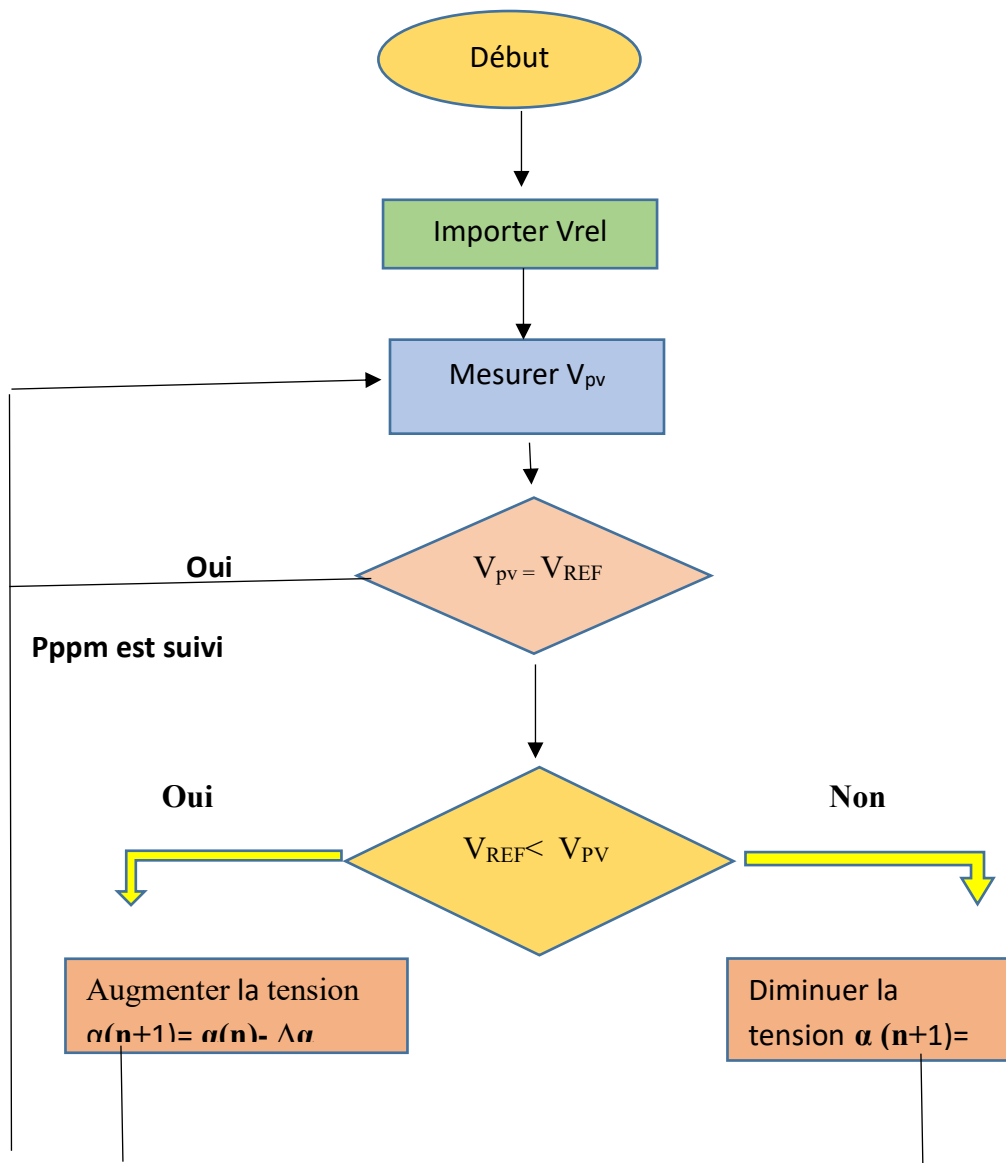


Figure II.15 : Algorithme de circuit ouvert

### II.4.2 Méthodes a contre réaction de courant :

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance :

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit.
- Méthode de maximisation du courant de sortie.

### II.4.3 Méthodes a contre réaction de puissance :

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative qui se charge de trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. L'évaluation de la puissance instantanée de ce dernier est élaborée par une simple multiplication de ces deux composantes  $P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$ . Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donne on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintien cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé :

- Méthode de perturbation et observation (P&O).
- Méthode de conductance incrémentale (Inc.).
- Méthode de Hill Colombin.

## II.5 Organigramme de l'Algorithme P&O :

La figure II.16 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. La figure montre les entrées du système MPPT ;  $\Delta P$  et  $\Delta V$  calculées à partir des signaux  $P(k)$ ,  $P(k-1)$ ,  $V(k)$  et  $V(k-1)$ , les signes de ces deux entrées sont exploités pour savoir dans quelle position de la courbe P-V on se trouve. D'abord la tension  $V$  et le courant  $I$  sont mesurés pour calculer la puissance  $P_k$ . Cette valeur  $P_k$  est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure  $P_{k-1}$ . Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémentations ou décrémentation du rapport cyclique  $\alpha$  continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur  $\Delta V$ .

- Si  $\Delta V > 0$  cela veut dire qu'on a incrémenté  $V$  durant le dernier cycle c'est-à-dire  $D_{k+1} = D_k +$

$\Delta D$  • Si  $\Delta V < 0$  cela veut dire qu'on a décrémente  $V$  durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre  $D_{k+1} = D_k - \Delta D$ . Donc on termine dans le chemin ou  $P$  continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou la décrémentation du rapport cyclique  $\alpha$  sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur  $\Delta V$ . Avec cet algorithme la tension de fonctionnement  $V$  est perturbée à chaque cycle. Dès que le MPP sera atteint,  $V$  oscillera autour du point de fonctionnement idéal  $V_{mpp}$ . Mais ceci cause des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation  $\Delta D$ . Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements soudains mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stables. Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables ou les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas du système ne peut être déterminée qu'expérimentalement où par simulation, est ainsi satisfaire un compromis entre la réponse rapide et perte de puissance dans les états stables.

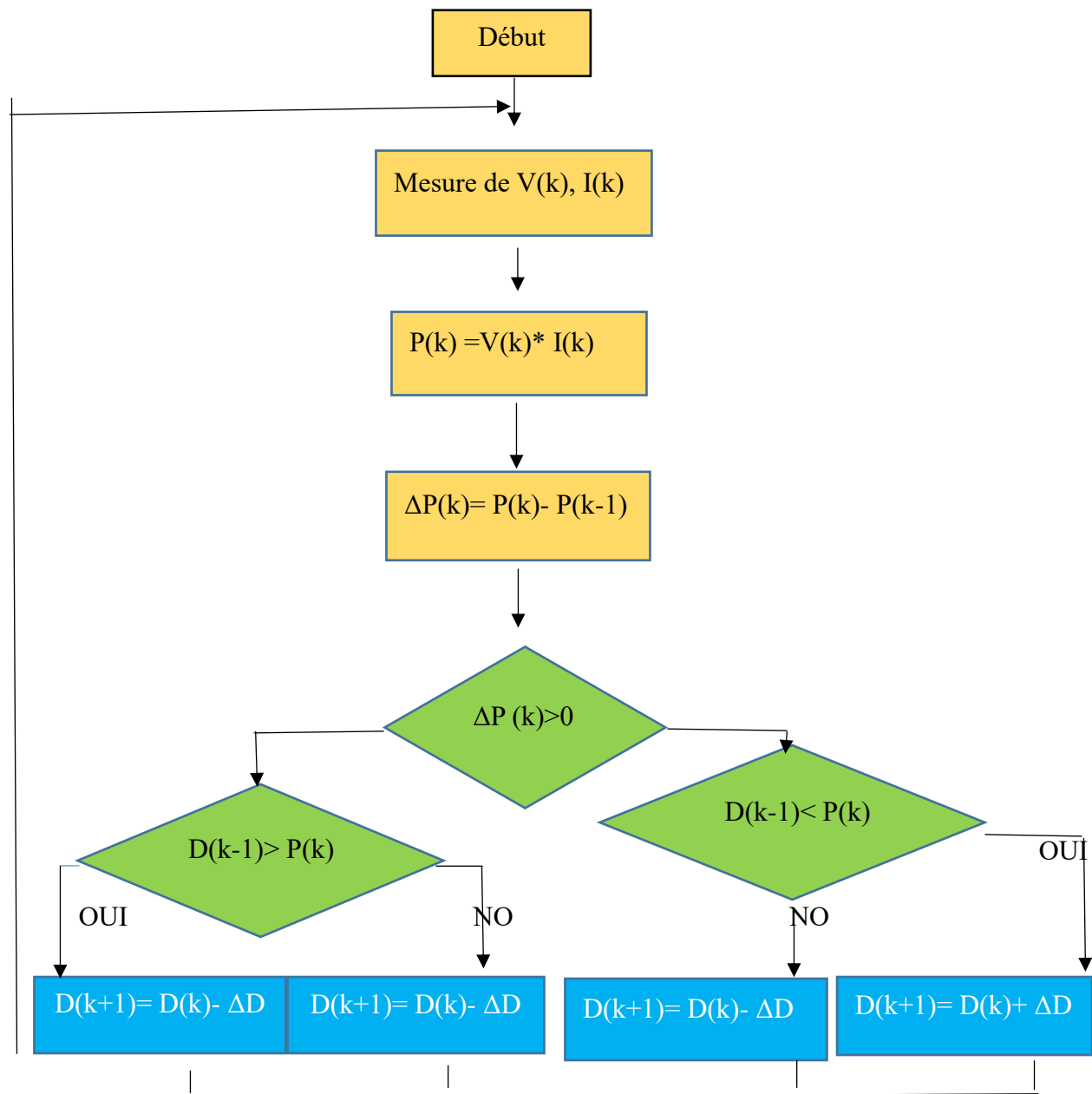


Figure II.16 : Organigramme d'algorithme Perturbation et Observation [15]

## II.6 Avantages et inconvénient de P&O :

### II.6.1 Avantage:

- ✓ Simplicité d'application : L'un des algorithmes les plus simples à programmer et à implémenter sur les microcontrôleurs.
- ✓ Aucune connaissance préalable du système n'est requise : Vous n'avez pas besoin de connaître les propriétés du panneau solaire ou le modèle mathématique du système.
- ✓ Pas cher et efficace : Convient aux systèmes simples et peu coûteux, car ils ne nécessitent pas de calculs complexes ni de capteurs avancés.

### II.6.2 Inconvénient:

- ✓ Plus lent que les algorithmes avancés comme Incrémental Conductance : Surtout dans les systèmes qui nécessitent une réponse rapide.
- ✓ Réponse inexacte aux changements soudains de rayonnement : Si l'intensité du soleil change soudainement (comme les nuages), l'algorithme peut mal se comporter et supposer qu'il a atteint son point maximum alors que ce n'est pas le cas.
- ✓ Oscillation autour du point de puissance maximale : L'algorithme entre toujours dans un petit état « D'oscillation » autour du point extrême, ce qui réduit légèrement l'efficacité.

## Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié deux types de convertisseurs, à savoir le convertisseur Boost, ainsi que diverses méthodes conventionnelles de suivi du point de puissance maximale (MPPT), appliquées à un système photovoltaïque comprenant un générateur photovoltaïque (GPV), un convertisseur Boost, une résistance et un contrôleur MPPT. Les méthodes de contrôle conventionnelles utilisées sont le Perturbation et Observation (P&O) Leurs performances ont été évaluées et analysées par simulation à l'aide de Matlab/Simulink.

Les résultats obtenus avec les méthodes conventionnelles ont été satisfaisants. Lorsque le système était soumis à des augmentations lentes de puissance causées par des variations lentes

et rapides de l'ensoleillement ou par une diminution de la température des cellules, une légère différence de réponse a été observée entre la méthode P&O, avec un léger retard pour la méthode P&O.

En conclusion, les méthodes conventionnelles étudiées ont montré leur efficacité dans le suivi du point de puissance maximale dans des conditions d'utilisation variables. Cependant, il est important de choisir la méthode adaptée en fonction des caractéristiques spécifiques du système photovoltaïque et des conditions d'ensoleillement auxquelles il est exposé. Des études supplémentaires peuvent être menées pour améliorer les performances et explorer d'autres techniques de MPPT plus avancées.

**Chapitre III :**  
*Résultat de simulation*

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque optimisé par une technique MPPT. L'objectif principal est d'analyser le comportement du système sous différentes conditions d'irradiation, et de démontrer l'efficacité de la commande MPPT basée sur l'algorithme Perturb and Observe (P&O).

La simulation constitue un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. Elle permet de tester le comportement du système dans des conditions contrôlables de manière simple, tout en assurant une surveillance précise de ses performances.

La procédure de simulation établit un lien essentiel entre les deux principales étapes de la conception d'un système : l'étude théorique et la réalisation expérimentale (ou le prototypage).

Ainsi, dans ce chapitre, nous mettrons à profit les connaissances développées dans le chapitre précédent (chapitre II), en procédant à une simulation sous MATLAB/Simulink. Cette simulation permettra d'évaluer les performances de l'algorithme P&O et d'analyser en détail les résultats obtenus.

## Chapitre III : Résultats de simulation

### III.1 Résultats de Simulation (système MPPT) :

#### III.1.1 Panneau Photovoltaïque :

Le bloc du panneau solaire est modélisé à l'aide d'équations électriques représentant le comportement dynamique d'une cellule photovoltaïque. Ce modèle prend en compte deux paramètres d'entrée principaux:

- L'irradiation solaire ( $G$ ), exprimée en  $W/m^2$
- La température ambiante ( $T$ ), en  $^{\circ}C$

En sortie, le modèle fournit les grandeurs électriques suivantes :

- La tension ( $V$ )
- Le courant ( $I$ )

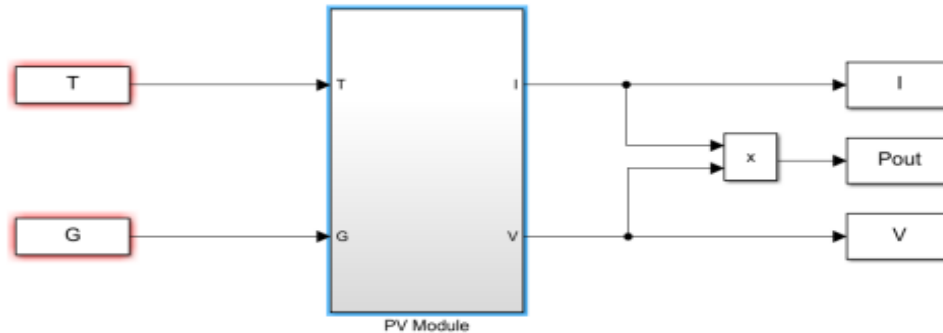
#### III.1.1.1 Schéma Bloc du Panneau PV:

La figure ci-dessous représente le schéma bloc simplifié du module photovoltaïque, tel qu'implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Comme on peut le voir :

- Les entrées du bloc sont :
  - $T$  : la température en  $^{\circ}C$
  - $G$  : l'irradiation solaire en  $W/m^2$
- Les sorties sont :
  - $I$  : le courant délivré par le panneau
  - $V$  : la tension de sortie
  - $P$  : la puissance instantanée, calculée par le produit :  $P=V \times I$

Ce modèle permet une représentation réaliste du comportement du panneau solaire en fonction des conditions environnementales ( $G$  et  $T$ ), et constitue la base pour l'analyse et l'optimisation à l'aide d'un algorithme MPPT.



**Figure III.1** : Schéma de bloc de PV sur Matlab

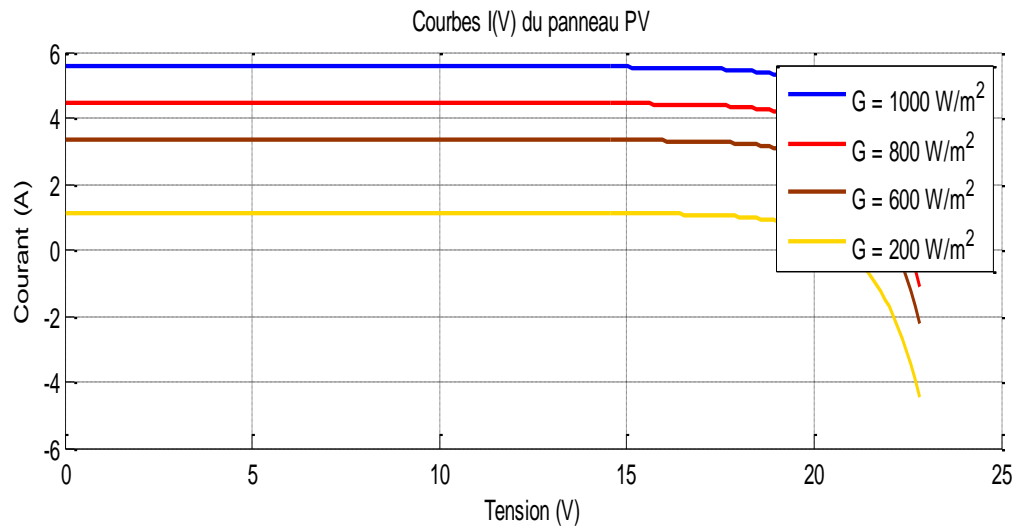
Les résultats représentés dans les figures suivantes :

D'un module photovoltaïque, obtenue sous des conditions standards d'ensoleillement et de température.

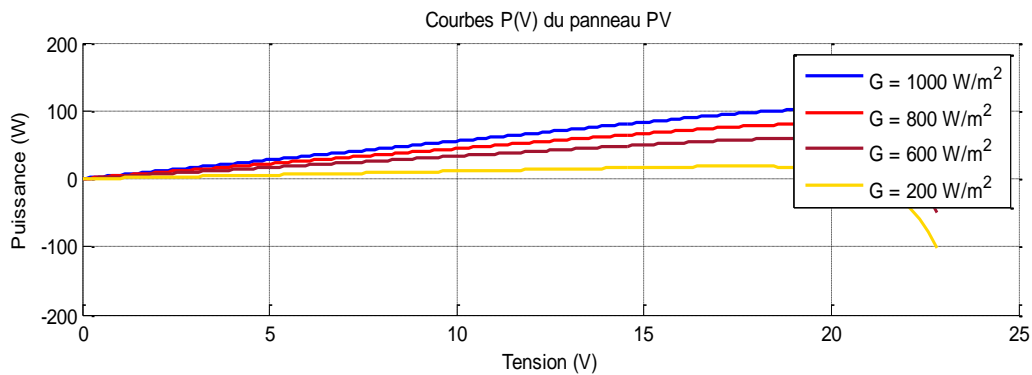
On observe que cette caractéristique présente :

- Un comportement de source de courant dans la zone quasi horizontale (à faible tension),
- Et un comportement de générateur de tension dans la zone quasi verticale (à faible courant).

Il est également important de noter l'existence d'un point de puissance maximale (MPP), situé au niveau du coude de la courbe I-V, où le produit  $P=V \times I$  est maximal. Ce point représente la condition de fonctionnement optimale du module photovoltaïque.



**Figure III.2 :** Caractéristiques courant-tension pour différents éclairements



**Figure III.3 :** Caractéristiques puissance-tension pour différents éclairements

Afin de visualiser l'influence de l'éclairement, la température ambiante est fixée à  $T = 25\text{ °C}$ , et l'éclairement est fait varier de  $G = 200\text{ W/m}^2$  à  $G = 1000\text{ W/m}^2$ , avec un pas de  $200\text{ W/m}^2$ .

D'après les résultats présentés dans la figure (III.4), on remarque que les valeurs du courant de court-circuit (I) et de la puissance de sortie (P) augmentent de manière proportionnelle avec l'intensité de l'éclairement, tandis que la tension à vide (V) ne varie que légèrement.

Par ailleurs, lorsque la température ambiante varie de  $25\text{ °C}$  à  $100\text{ °C}$ , par pas de  $25\text{ °C}$ , sous un éclairement constant, on observe une diminution significative de la tension, alors que le courant restera relativement stable.

Cela s'explique par le fait que la tension d'un module photovoltaïque est inversement proportionnelle à la température, en raison des caractéristiques intrinsèques des semi-conducteurs utilisés.

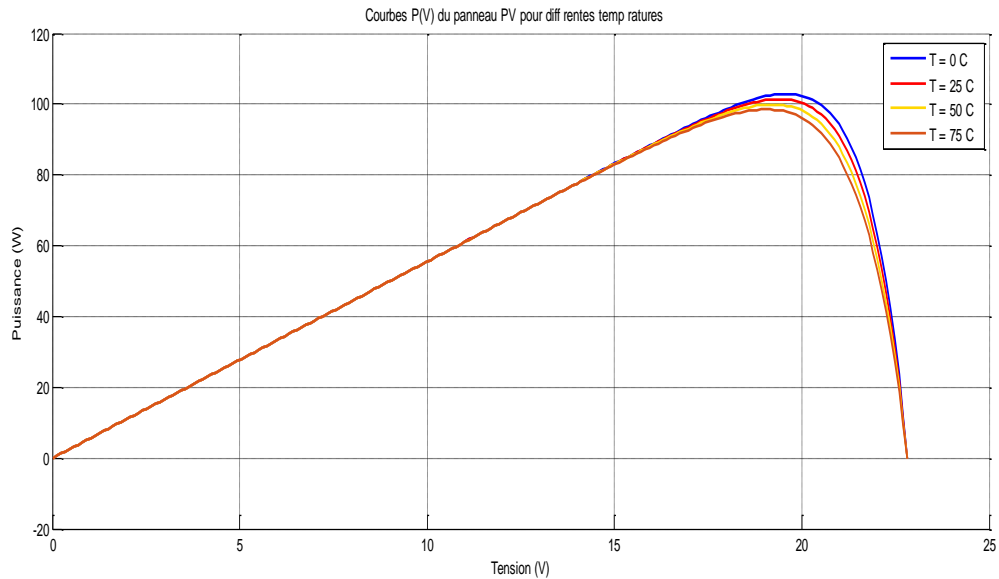


Figure III.4 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures

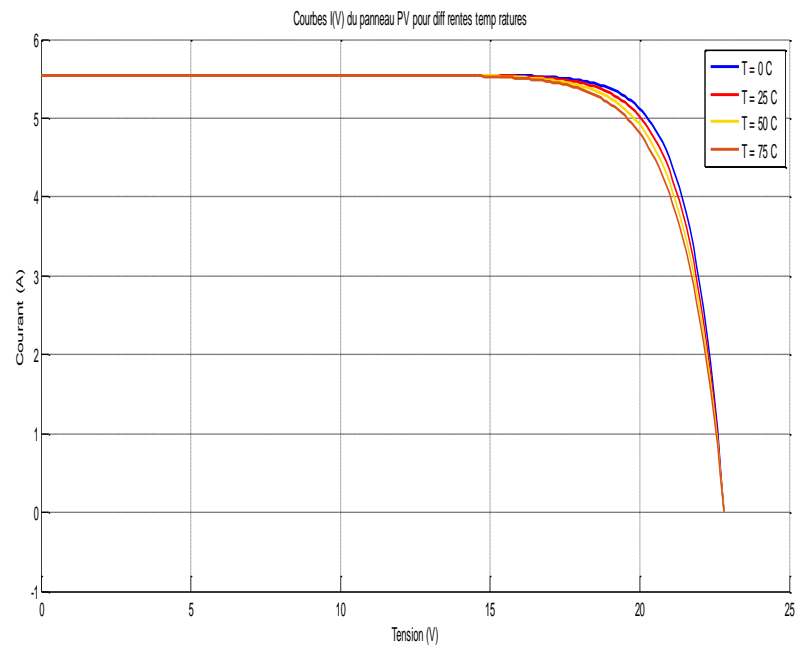


Figure III.5 : Caractéristiques courant-tension pour différentes températures

### III.1.1.2 Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque :

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation constitue un enjeu fondamental. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe, car la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement, de la température ambiante, entre autres paramètres. Il est donc nécessaire de disposer d'un dispositif capable de fonctionner en permanence au point de fonctionnement optimal.

Ces dernières années, plusieurs dispositifs ont été développés, chacun avec des méthodes plus élaborées que les précédentes. Dans la littérature, les auteurs passent en revue différentes méthodes de maximisation de puissance, généralement classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

Pour les sources énergétiques photovoltaïques, cela revient à rechercher le point de puissance maximale. Ce type de commande est souvent désigné sous le nom de « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou, en anglais, « Maximum Power Point Tracking » (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM), tout en assurant une adaptation optimale entre le générateur et sa charge, afin de transférer la puissance maximale possible [25 ,26].

### III.1.2 Résultats:

Le panneau photovoltaïque est un dispositif qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Son comportement électrique est modélisé par un modèle à une diode incluant des résistances parasites, ce qui permet de représenter fidèlement la relation courant-tension (I-V) ainsi que la courbe puissance-tension (P-V).

Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink montrent que la caractéristique I-V du module PV présente une zone quasi-constante en courant (comportement de source de courant) à basse tension, et une zone quasi-constante en tension (comportement de générateur de tension) à faible courant. Un point crucial est le point de puissance maximale (MPP), situé au « coude » de la courbe, représentant la condition optimale de fonctionnement du module.

L'analyse des effets de l'irradiation et de la température sur les performances du panneau indique que :

- Une augmentation de l'irradiation accroît le courant et donc la puissance disponible.
- Une élévation de la température diminue la tension en circuit ouvert, ce qui réduit légèrement la puissance maximale.

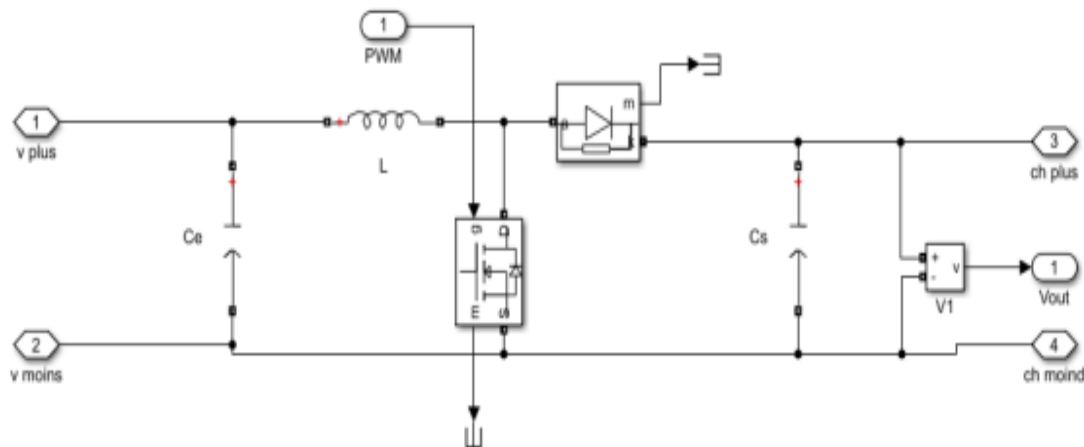
Ainsi, pour exploiter pleinement le potentiel du panneau photovoltaïque malgré les variations environnementales, il est nécessaire d'implémenter une technique de suivi du point de puissance maximale, telle que l'algorithme MPPT.

### III.2 L'HACHEUR BOOST :

Dans un système photovoltaïque, la tension de sortie du panneau solaire peut varier en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. Afin d'optimiser l'énergie extraite et d'adapter la tension aux besoins de la charge ou du système de stockage, on utilise un convertisseur DC-DC, plus précisément un hacheur élévateur (boost).

Le rôle principal de ce convertisseur est d'augmenter la tension continue provenant du panneau PV tout en contrôlant le courant de sortie. Ce contrôle est essentiel pour permettre au système MPPT d'ajuster le point de fonctionnement du panneau afin d'extraire la puissance maximale.

Le fonctionnement du convertisseur boost repose sur un interrupteur électronique (généralement un transistor MOSFET) qui, en s'ouvrant et se fermant rapidement, stocke et libère de l'énergie dans une inductance. Ce procédé permet d'augmenter la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée.



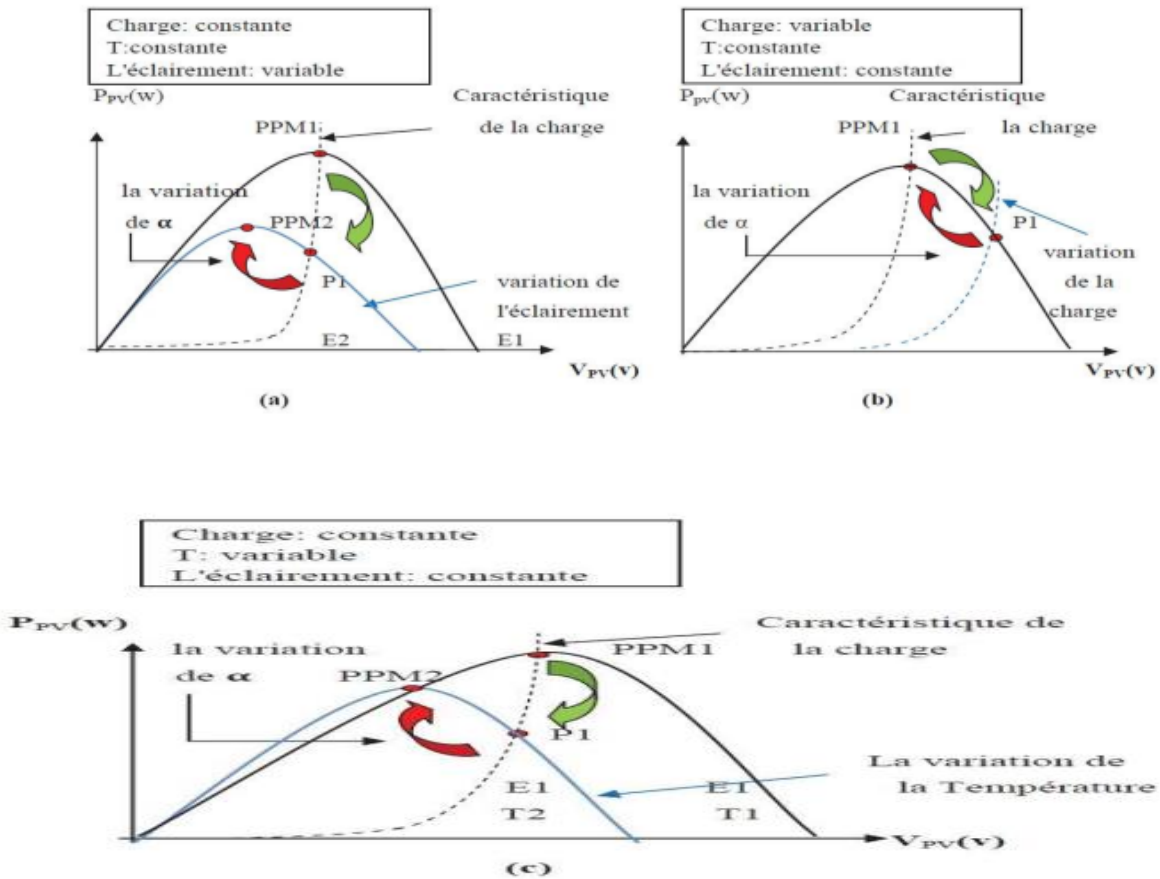
**Figure III.6 :** Schéma bloc convertisseur BOOST

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur de la figure III.12 et 13 est obtenu à l'aide du modèle mathématique sous Matlab/Simulink,

### III.3 Contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking)

#### III.3.1 Gestion de la MPPT:

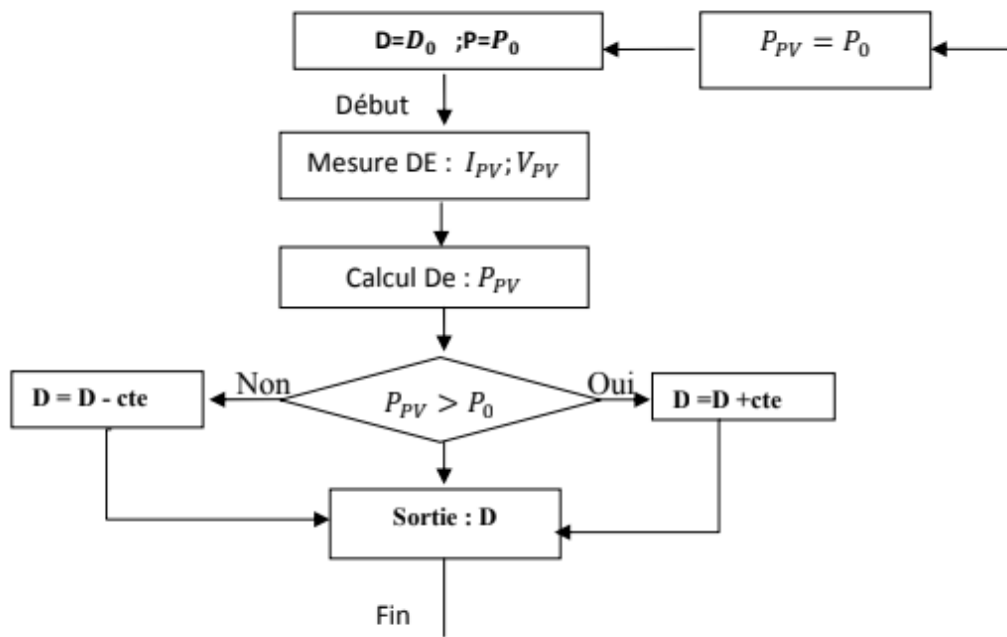
La figure III.17 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de Fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lier aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [26].



**Figure III.7** : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température

### III.3.1.1 Les premiers types de commande MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer [26]. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en figure III.18 et peut être implanté entièrement en numérique.



**Figure III.8** Principe de la première commande MPPT numérique [26].

Il consiste à calculer la puissance à l'instant  $t_i$  à partir des mesures de IPV et VPV, et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant  $t_{i-1}$ . De là, un nouveau rapport cyclique  $D$  est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement.

### III.3.1.2 La méthode de P&O :

Ici a été utilisé un bloc prédéfini de la P&O proposé par Matlab, auquel on introduit  $\Delta P$ ,  $\Delta V$  et le rapport cyclique de l'itération précédente. Le schéma bloc est donné par la figure suivante

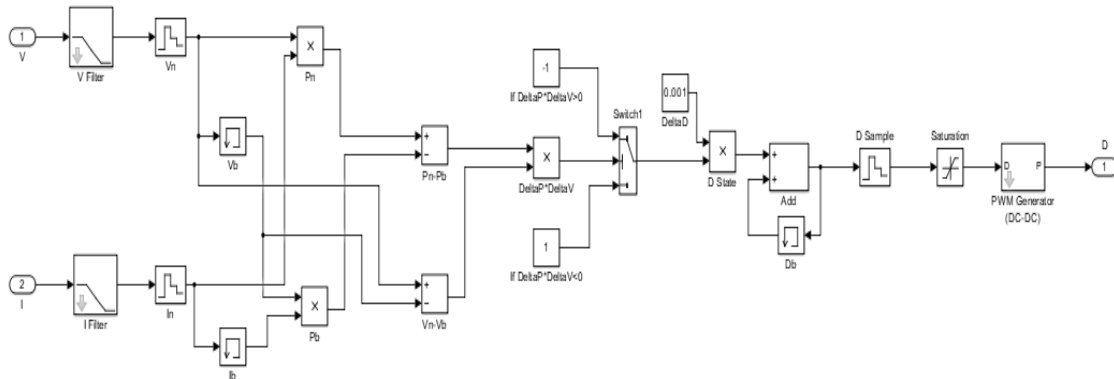


Figure III.9 : schéma bloc de P&O

Variation de la tension pour  $T=25^{\circ}\text{C}$  et différentes valeurs de  $G$  (800-1000-600  $\text{W}/\text{m}^2$ ) :

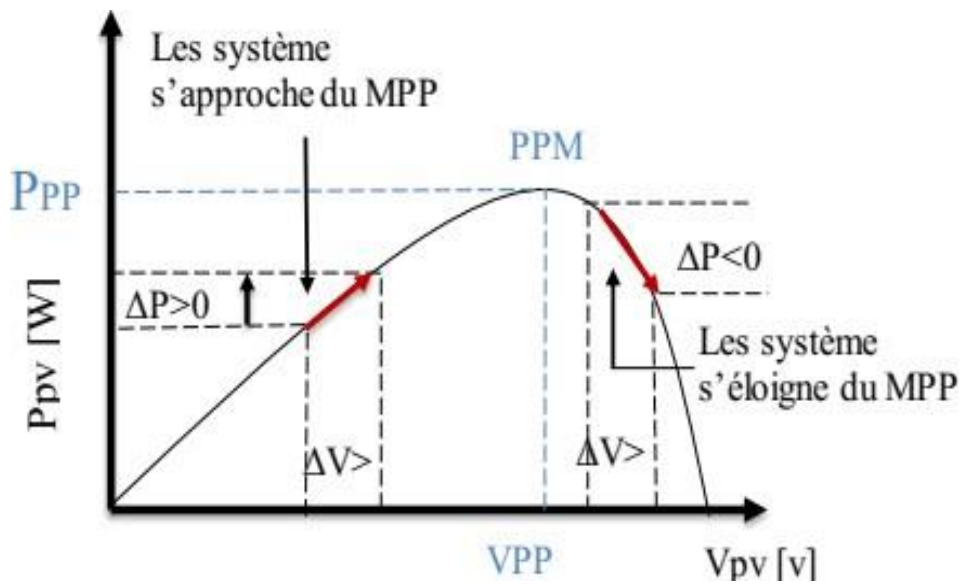


Figure III.10 : Caractéristiques de fonctionnement de l'Algorithme P&O

Cette courbe montre que si la puissance augmente la perturbation va continuer dans le même sens sinon la perturbation sera inversée:  $dP > 0$  perturbation dans le même sens  $dP < 0$  perturbation dans le sens inverse.

### III.3.2 Description du fonctionnement:

- Le système mesure en continu la tension (V) et le courant (I) du panneau photovoltaïque.
- La puissance instantanée est calculée comme  $P=V \times I$
- La méthode P&O perturbe périodiquement la tension en modifiant le Duty cycle (rapport cyclique) du convertisseur DC-DC.
- Ensuite, elle compare la puissance mesurée avec la puissance précédente :
  - Si la puissance augmente, la perturbation continue dans la même direction.
  - Sinon, la direction de la perturbation est inversée.
- Ce processus permet d'approcher et de maintenir le point de puissance maximale malgré les variations d'irradiation et de température

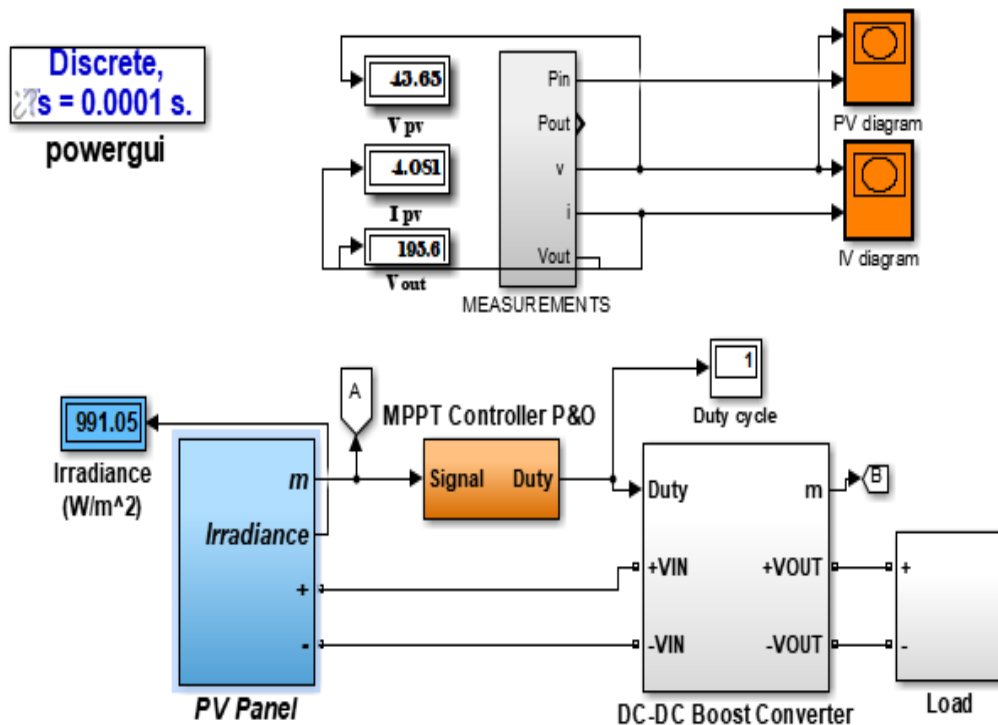


Figure III.11 : schémas représentent l'architecture du système simulé

Ce modèle comprend :

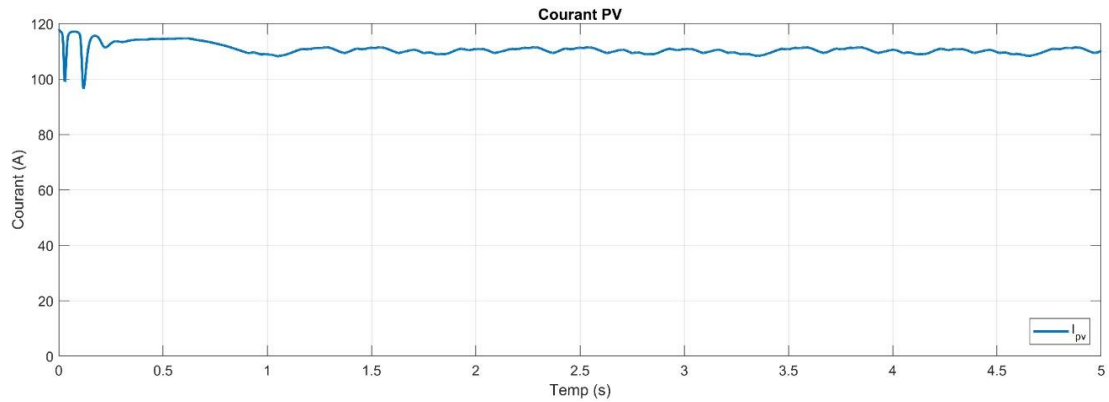
- Bloc « PV Panel » : génère la puissance en fonction de l'irradiation.
- Contrôleur MPPT (P&O) : génère un cycle de commande pour le convertisseur.
- Convertisseur DC-DC de type Boost : ajuste la tension de sortie.
- Bloc «Charge»: consomme l'énergie délivrée.
- Source d'irradiation variable : permet de tester le comportement du MPPT sous différentes
- conditions

### Analyse des résultats

- Irradiation (G) passant de 1000 W/m<sup>2</sup> à 500 W/m<sup>2</sup> à t=5s.
- Température (T) constante à 25°C.

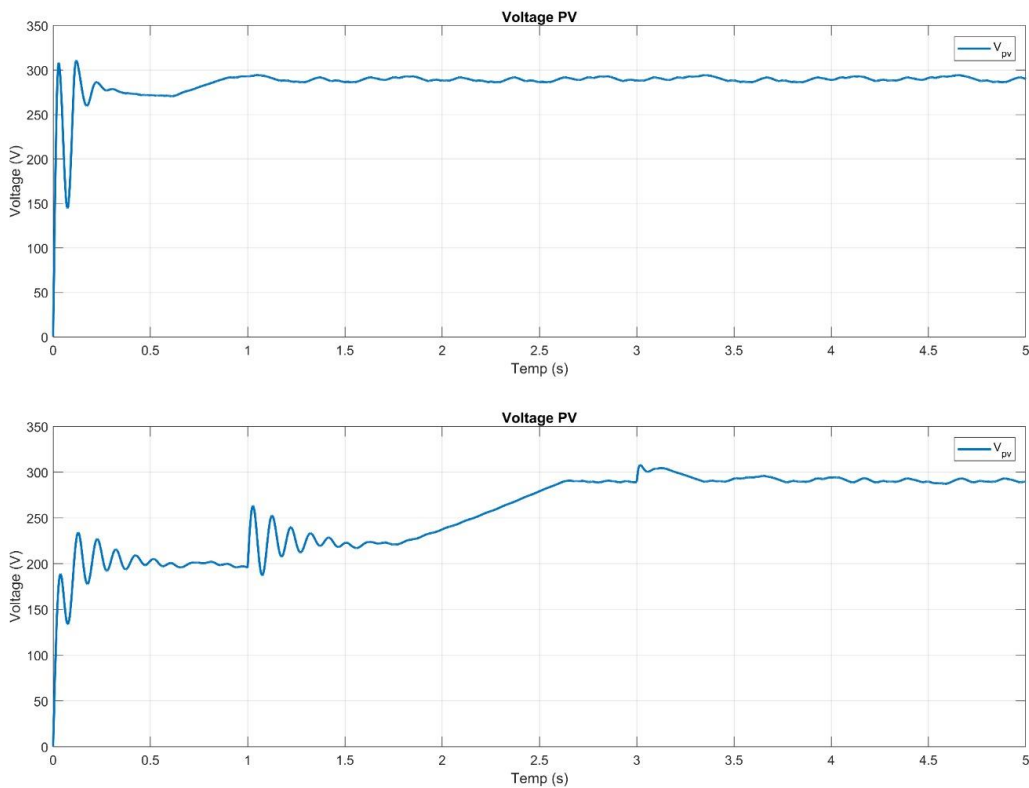
La figure III.12 présente les courbes de la tension (Source Voltage) et de la puissance (Source Power) générées par le champ photovoltaïque (PV Array) sous l'effet d'une irradiation variable, à température constante (25 °C). Au démarrage, on observe des oscillations transitoires de courte durée au niveau de la tension et de la puissance, traduisant une phase d'établissement dynamique du système avant d'atteindre un régime stable. Par la suite, la tension se stabilise autour d'une valeur quasi constante, ce qui reflète l'efficacité du système de régulation à maintenir une tension stable.

En ce qui concerne la puissance, la courbe montre une chute brutale initiale, suivie d'une stabilisation progressive. Cette chute est attribuée à la réponse dynamique rapide du système lors de la mise en marche, avant que la puissance ne se stabilise. Il convient de noter que l'irradiation passe de 1000 W/m<sup>2</sup> à 500 W/m<sup>2</sup> à t = 5 s. Toutefois, les courbes affichées couvrent une période très courte (de 0 à 0,2 seconde), et l'effet de ce changement d'irradiation n'est donc pas visible dans cette fenêtre temporelle. Ces courbes représentent uniquement la réponse instantanée du système au démarrage.



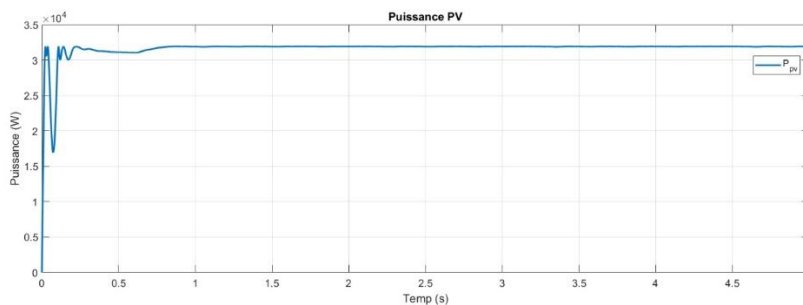
**Figure III.12** caractéristiques de courant

Le graphique de la Figure III.12 illustre l'évolution du courant produit par le générateur photovoltaïque (PV) en fonction du temps. Après une phase transitoire très brève accompagnée de faibles oscillations initiales, le courant se stabilise rapidement autour de 110 A. Cette stabilité du courant témoigne d'un fonctionnement efficace et stable du système PV en régime permanent. L'amplitude réduite des fluctuations montre une bonne régulation du courant malgré de possibles perturbations. Globalement, le system présente une dynamique rapide et fiable.



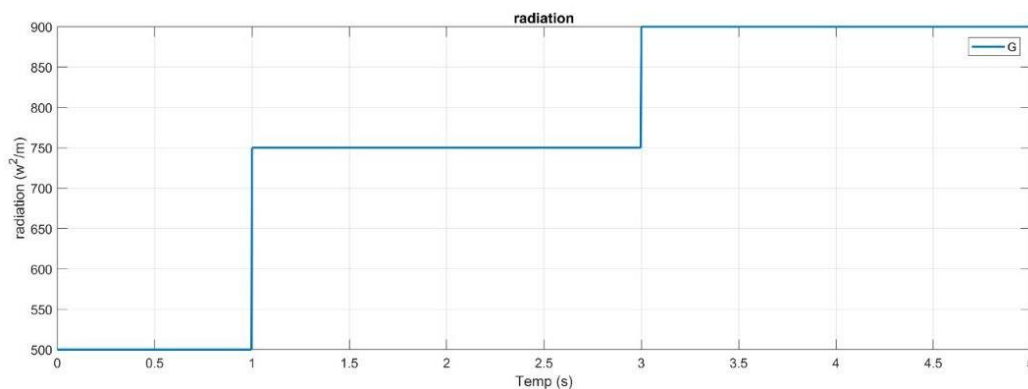
**Figure III.13** caractéristiques de voltage

La Figure III.13 montre les caractéristiques de tension (voltage) d'un système photovoltaïque (PV) sur une période de 5 secondes. Les deux courbes illustrent une phase transitoire au début avec des oscillations marquées, indiquant l'adaptation initiale du système aux conditions de fonctionnement. Dans la première courbe, la tension se stabilise autour de 200 V après environ 1 seconde, montrant un comportement stable. La seconde courbe, quant à elle, présente une montée progressive de la tension vers 300 V, accompagnée de faibles ondulations. Cela suggère une adaptation dynamique ou un changement de point de fonctionnement (ex. : MPPT). Le système atteint dans les deux cas un régime permanent stable.



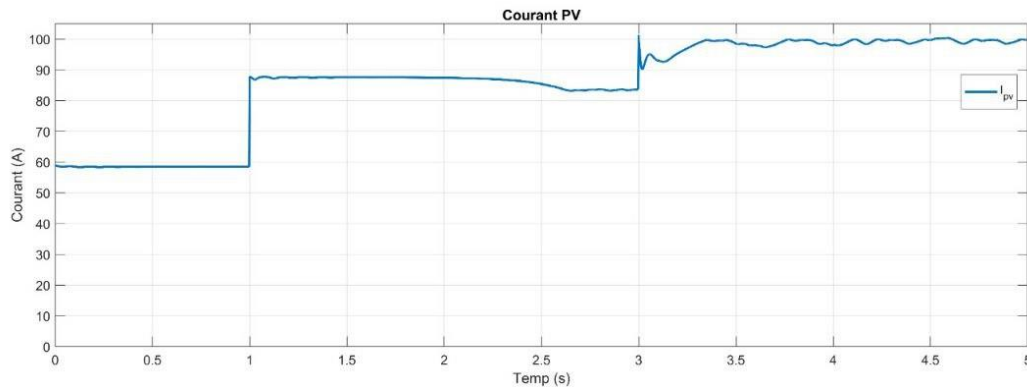
**Figure III.14** caractéristiques et résultat de puissance

La Figure III.14 montre les caractéristiques de la puissance de sortie d'un système photovoltaïque (PV) sur une période de 5 secondes. La courbe illustre une phase transitoire au début avec des fluctuations marquées, indiquant l'adaptation initiale du système. Après environ 1 seconde, la puissance se stabilise autour d'une valeur quasi constante. Cette stabilisation souligne le fonctionnement stable du système une fois le régime permanent atteint. Ainsi, le système parvient à s'adapter et à assurer une production d'énergie stable malgré les variations initiales."



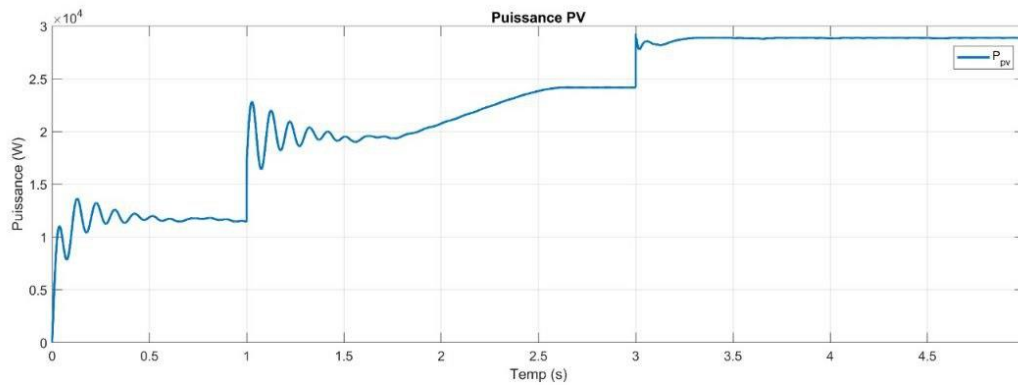
**Figure III.15** : Évolution de l'irradiation solaire en paliers en fonction du temps

La courbe illustre l'évolution de l'irradiation ( $G$ ) incidente sur le générateur photovoltaïque en fonction du temps. Au démarrage (jusqu'à 1 seconde), l'irradiation est maintenue à une valeur relativement stable d'environ  $500 \text{ W/m}^2$ . Vers  $t = 1$  seconde, on observe une augmentation brusque jusqu'à  $750 \text{ W/m}^2$ , ce palier se stabilise jusqu'à  $t \approx 3$  secondes. Puis, à  $t = 3$  secondes, l'irradiation connaît une seconde hausse rapide, passant de  $750 \text{ W/m}^2$  à  $900 \text{ W/m}^2$ , et garde ce nouveau palier jusqu'à la fin de l'enregistrement.



**Figure III.16:** Évolution du courant photovoltaïque en fonction du temps

La courbe illustre le comportement du courant généré par le générateur photovoltaïque ( $I_{pv}$ ) en fonction du temps. Au démarrage (jusqu'à  $t \approx 1$  seconde), le courant se maintient de manière quasi-stable autour de  $60 \text{ A}$ , ce qui correspond à des conditions d'irradiation faibles. Vers  $t = 1$  seconde, le courant présente une augmentation rapide jusqu'à environ  $88 \text{ A}$ , en raison de l'élévation de l'irradiation. Cette valeur se stabilise jusqu'à  $t \approx 3$  secondes, avec quelques fluctuations légères pouvant s'expliquer par des transitions dynamiques dans le système. Après  $t = 3$  secondes, le courant connaît une seconde montée, jusqu'à environ  $100 \text{ A}$ , puis se maintient de manière quasi-stable jusqu'à la fin de l'enregistrement, avec de faibles ondulations. Ces comportements mettent en valeur la capacité du générateur photovoltaïque à s'adapter rapidement aux variations d'irradiation, ce qui se traduit par une augmentation quasi-instantanée de son courant de sortie



**Figure III.17 :** Évolution de l'irradiation solaire en paliers en fonction du temps

La courbe montre une montée en puissance photovoltaïque avec des oscillations transitoires en début de fonctionnement. La puissance passe d'environ 0 MW à  $1,2 \times 10^4$  W en 1 seconde, puis présente une seconde étape de montée rapide jusqu'à environ  $2,9 \times 10^4$  W vers 3 secondes. Une fois ce maximum atteint, le système se stabilise autour de  $2,9 \times 10^4$  W, indiquant l'atteinte d'un régime permanent.

### III.4 Caractéristique de tension :

#### III.4.1.1 Analyse et interprétation des résultats :

Dans le but d'évaluer les performances du système photovoltaïque simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink, une série de résultats ont été obtenus à travers des tests de simulation prenant en compte différentes conditions climatiques (variation de l'irradiation et de la température). Ces résultats permettent de mieux comprendre le comportement du système global ainsi que l'efficacité de la commande MPPT implémentée.

#### III.4.1.2 Suivi du point de puissance maximale (MPPT) :

Les courbes de tension ( $V_{pv}$ ) courant ( $I_{pv}$ ) et puissance ( $P_{pv}$ ) du générateur photovoltaïque montrent clairement que l'algorithme Perturb and Observe (P&O) permet de suivre efficacement le point de puissance maximale. Après chaque perturbation, le système ajuste le rapport cyclique du convertisseur BOOST pour maximiser la puissance délivrée. On observe une convergence rapide vers la valeur optimale, avec une légère oscillation autour de celle-ci, ce qui est caractéristique de la méthode P&O.

#### III.4.1.3 Reaction aux variations d'ensoleillement:

Lorsque l'éclairement varie brusquement (par exemple, de 1000 W/m<sup>2</sup> à 600 W/m<sup>2</sup>), la tension du panneau photovoltaïque s'ajuste rapidement, et la puissance chute temporairement. Toutefois, le système retrouve rapidement un nouveau point de fonctionnement optimal. Cela témoigne de la robustesse du système de commande MPPT face aux variations des conditions atmosphériques

#### III.4.1.4 Stabilité de la tension de sortie :

La tension en sortie du convertisseur DC-DC (tension de la charge  $V_s$ ) reste stable grâce à la régulation efficace du rapport cyclique généré par la commande MPPT. Cela garantit une alimentation stable de la charge DC, ce qui est crucial pour les systèmes autonomes

#### III.4.1.5 Comportement dynamique du système:

L'analyse transitoire montre que le système a un bon temps de réponse et une stabilité acceptable. Il n'y a pas de dépassements importants ni d'oscillations prolongées, ce qui valide la conception du convertisseur BOOST et la commande intégrée

À travers les courbes obtenues, on constate que l'algorithme P&O permet un bon suivi du point de puissance maximale, avec une oscillation faible autour de la valeur optimale. La tension de sortie se stabilise rapidement après une variation de l'ensoleillement, ce qui prouve l'efficacité de la commande MPPT implémentée

#### Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le fonctionnement de le hacheur série DC-DC (Buck) et la commande MPPT, Le convertisseur Buck et l'algorithme (Perturb & Observe) sont simulés en utilisant la boîte outil Sim Power System du Matlab/Simulink Version 2009. D'après les résultats obtenus, on remarque que le convertisseur DC-DC (Buck) et la commande MPPT effectuent correctement ses rôles d'atteindre le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement.

## Conclusion Générale et Perspectives

Ce travail avait pour objectif principal la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque, destiné à alimenter une charge en courant continu. Les principales étapes abordées dans cette étude sont résumées comme suit :

1. Modélisation du générateur photovoltaïque : Nous avons commencé par étudier le principe de l'effet photovoltaïque ainsi que les équations électriques qui décrivent le comportement d'une cellule solaire. Sur cette base, un modèle du générateur photovoltaïque a été implémenté sous l'environnement MATLAB/Simulink, permettant d'observer les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sous différentes conditions d'ensoleillement et de température.

2. Implémentation de l'algorithme MPPT : Nous avons ensuite intégré un convertisseur élévateur de type BOOST piloté par une commande MPPT. Après une analyse comparative des différentes topologies de convertisseurs DC-DC, le modèle a été développé en utilisant la méthode de Perturbation et Observation (P&O), largement utilisée dans les systèmes de suivi de puissance maximale.

Les simulations ont montré que :

- Le régulateur MPPT par P&O permet un suivi efficace du point de puissance maximale, avec une bonne stabilité même en cas de variations brutales de l'éclairement.
- La tension du bus DC reste bien régulée, sans dépassement notable, assurant ainsi un bon fonctionnement du système.

Ce projet ouvre la voie à plusieurs perspectives intéressantes, notamment :

- L'intégration de sources d'énergie supplémentaires pour former un système hybride plus complexe.
- L'étude de scénarios d'ombrage partiel et l'utilisation de méthodes MPPT avancées telles que l'Extremum Seeking Method (ESM).
- Le dimensionnement optimisé des composants du système à l'aide de logiciels spécialisés pour une meilleure rentabilité technico-économique.
- L'exploration d'algorithmes de commande plus performants (MPPT flous, intelligents, etc.).

- L'implémentation de nouveaux types de convertisseurs DC/DC pour améliorer la flexibilité du système.

En somme, ce travail a permis de valider par simulation les performances d'un système photovoltaïque avec une commande MPPT efficace, tout en posant les bases pour des améliorations futures à la fois techniques et économiques.

## Références

- [1] Z. Souad, Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs, Université Oum El Bouaghi, 2008.
- [2] BAADJIA et CHERGUI.I, Extraction des Paramètres du Module Photovoltaïque, M'silla: Université de M'silla, 2019.
- [3] A. M. Nader, Conception d'un onduleur solaire avec MPPT intégré, Oum El Bouaghi: Université Larbi Ben M'hidi, 2018.
- [4] L. Baxerres, Aurélie Michallet et Céline Ramet, Partie électronique et énergétique, 2006.
- [5] CiviSol, «Comprendre les caractéristiques de votre panneau solaire,» EURL Mentions légales, [En ligne]. Available: <https://www.civisol.fr/info/8-le-panneau-solaire-photovoltaïque#ancre1>.
- [6] B. Djamil, optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage, Constantine: Université de Constantine, 2007.
- [7] d. d. c. BELPOWER, Installations photovoltaïques, Systèmes autonomes.
- [8] M. Rachid, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah, Tlemcen: Mémoire De Magister soutenue, 2005.
- [9] AOUISSI.I et BERKOUS.M, Commande MPPT d'un système photovoltaïque utilisant différentes structures de convertisseur statique DC/DC, Université de Guelma, 2018.
- [10] A. Houari, Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques, Université de Lorraine, 2012.
- [11] S. Vighetti, Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion, Université de Grenoble, 2010.
- [12] J. D. J. G. a. A. M. J. P. David, Electrical and thermal testing and modelling of breakdown in space solar cells and generators, Photovoltaic Specialists Conference, 1993.
- [13] C. Cabal, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Paul Sabatier: Université de Toulouse III, 2008.

- [14] BENDJELLOULIZakaria, "contribution à la modélisation d'une cellule solaire", Mémoire de magister, UNIVERSITE DE BECHAR, le 28/06/2009.
- [15]. F. Slama, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique", mémoire de Magister, département d'Electrotechnique , Université de Sétif 2012.
- [16].A. Benayad, "Modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing." , mémoire de Magister, département de Génie Electrique, Université de Béjaia 2011.
- [17]. O. Gerglud, "Analysis and experimental validation of various photovoltaic system models ", PhD-thesis , Mc Gill University Montreal, Canada, 2002.
- [18] Salim Abouda, " Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompage", Thèse de doctorat en cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 2015.
- [19] FERRAH FATEH, " Etude et simulation d'un étage MPPT pour un système à énergie renouvelable ", Mémoire de Master, Université Larbi ben M'Hidi– Oum El Bouaghi. 2013
- [20] MAKHLOUF, Commande MPPT d'UN système photovoltaïque avec convertisseur DC-DC Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2014
- [21] Ben Mohammed, M. Etude ET simulation des différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques. Mémoire de Master. Université Bejaia 2017
- [22] Hohm, D. P., & Ropp, M. E. (2000). Comparative study of maximum power point tracking algorithms. *Progress in Photovoltaïque : Resarci and Applications*, 11(1), 47-62.
- [23] J. Appelbaum and M.S. Sarma, 'The Operation of Permanent Magnet DC Motors Powered by a Common Source of Solar Cells', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, N°4, pp. 635 - 642, 1989

[24] C. CABAL 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ', Thèse de doctorat université de Toulouse III ,2008.

[25] Y. PANKOW 'Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque', thèse de doctorats de l'école nationale, 2004.

[26] Mlle BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA 'La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite' Thèse de master université tlemcen 2013/2014