

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'électrotechnique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Commandes Electriques  
Thème

## Etude d'un Système de production d'énergie photovoltaïque à base d'un CVS Boost.

Présenté Par :

- 1) Melle. BEN ZAOUCHE Nadjoua
- 2) Melle. OULDKADI Amina

Devant le jury composé de :

Dr. BERRACHED Djelloul	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. FLITTI Mohamed	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. BENZAZZA Baghdadi	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr. ADJOUDJ Reda	M A A	UDL (Sidi Bel Abbés)	Co-Encadrant

*Année universitaire 2020/2021*

# **REMERCIEMENTS**

Le plus grand merci s'adresse au bon Dieu, le tout puissant de nous avoir  
accordé le courage et la volonté pour accomplir  
ce modeste travail.

Nous remercions nos familles et tous nos amis qui nous ont toujours  
encouragé et soutenu durant toutes nos études.

Nous tenons également, à exprimer nos remerciements à notre  
Encadreur, monsieur Benazza Baghdadi, Maitre de conférence  
en Génie électrique à L'université d'Ain Témouchent,  
pour avoir dirigé ce travail, pour ses grandes  
compétences scientifiques.

Nous remercions les membres de jury qui ont bien voulu accepter  
d'examiner ce mémoire et à cet égards nous leurs présentons  
nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Nous rendons grâce à tous les enseignants du département  
Génie électrique, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui  
ont contribué, à ce que ce travail prenne forme.

# DÉDICACES

A toi seigneur DIEU tout puissant créateur du ciel et de la terre.

Je te remercie pour m'avoir donnée la vie, être qui je suis et arrivée là où je suis.

A la flemme de mon cœur.

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que

je dédie mon travail à yemma, belle et courageuse, une source

de volonté et de puissance, pour ses sacrifices, son amour,

sa tendresse, son soutien et ses prières tout au long

de mes études.

A mon père mes frères et ma sœur pour leurs appuis et leur encouragement.

A toutes mes cousines et toute ma famille, une famille en OR

grâce à elle j'ai surmontée la difficulté de la vie.

A ma copine, tu es rare.

A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur

soutien, pendant mes années d'études.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués,

et le fruit de votre soutien infallible.

NADJOUA

# DÉDICACES

En tout premier je remercie DIEU tout puissant de m'avoir donné la force pour dépasser  
toutes les difficultés.

Je dédie ce modeste travail à ma source d'amour et d'affection ma chère mère qui m'a  
soutenu toute ma vie pour réussir et pour son encouragement infinie.

Que ce travail traduit ma gratitude.

A mon père et ma sœur.

A la personne qui m'a toujours aidée et soutenu pendant les périodes difficiles.

A toute ma famille et amis.

Un remerciement spécial a mon binôme Nadjoua.

AMINA

## ملخص

لا يزال الاتصال بين مولد الكهروضوئية والشحنة في موضوع الدراسة. يعد تكيف الوشيجة بين مولد والشحنة مشكلًا تكنولوجيًا يعني بشكل أساسي نقل الطاقة القصوى من مولد إلى الشحنة. يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بدراسة سلسلة تحويل الكهروضوئية.

أظهرت الدراسة ومحاكاة عناصر هذه السلسلة أن العنصر الرئيسي في السلسلة، المولد الكهروضوئي، لا يمكن أن يوفر قوة قصوى إلا لقيم معينة من التيار و التوتر. وبالتالي، من أجل العثور على نقطة أقصى قوة، وإدراج مرحلة التكيف بين مولد الكهروضوئية والشحنة المحتاجة. تم تحقيق هذه المرحلة في حالتنا باستخدام المحول Boost و خوارزمية MPPT (P&O).

**الكلمات الرئيسية:** محول DC / DC. خوارزمية MPPT (P&O)، مولد الكهروضوئية.

## Abstract

The connection between a photovoltaic generator (GPV) and a load is still a subject of study. The impedance matching between a PV generator and a DC load is a technological problem that essentially means transferring the maximum power from the PV generator to the load. The work presented in this thesis concerns the study of the photovoltaic conversion chain.

The study and the simulation of the elements of this chain showed that the main element of the chain, the photovoltaic generator GPV, can deliver a maximum power only for particular values of the current and the voltage. Thus, in order to find the point of maximum power, the insertion of an adaptation stage between the GPV and the load is necessary. This stage was realized in our case using a Boost DC / DC converter and the MPPT (P & O) algorithm.

**Keywords Simulation :** DC / DC converter. MPPT algorithm (P & O), Photovoltaic generator (GPV), Irradiance.

## Résumé

La connexion entre un générateur photovoltaïque (GPV) et une charge reste encore un sujet d'étude. L'adaptation d'impédance entre un générateur PV et une charge est un problème technologique que signifie essentiellement le transfert du maximum de puissance du générateur PV à la charge. Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de la chaîne de conversion photovoltaïque.

L'étude et la simulation des éléments de cette chaîne ont montré que l'élément principal de la chaîne, le générateur photovoltaïque GPV, ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. Ainsi, afin de poursuivre le point de puissance maximale, l'insertion d'un étage d'adaptation, entre le GPV et la charge est nécessaire. Cet étage a été réalisé dans notre cas en utilisant un convertisseur DC/DC Boost et l'algorithme MPPT (P&O).

**Mots clés :** Simulation. Convertisseur DC/DC. Algorithme MPPT (P&O), Générateur photovoltaïque (GPV), Eclairement.

## **LISTE DES FIGURES :**

<b>Figure I-1 :</b> Les cinq grands types d'énergies renouvelables.....	4
<b>Figure I-2 :</b> Les énergies renouvelables.....	4
<b>Figure I-3 :</b> Types de rayonnement solaire reçus au sol.....	7
<b>Figure I-4:</b> Constitution d'une cellule photovoltaïque.....	8
<b>Figure I-5:</b> Cellule solaire au silicium monocristallin.....	9
<b>Figure I-6 :</b> Cellules poly-cristallines.....	9
<b>Figure I-7:</b> Cellules Couche mince (Amorphe).....	10
<b>Figure I-8 :</b> La jonction PN.....	10
<b>Figure I-9:</b> Constitution du module photovoltaïque.....	11
<b>Figure I-10 :</b> Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	12
<b>Figure I-11:</b> Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.....	13
<b>Figure II-1:</b> Schéma d'une cellule solaire.....	17
<b>Figure II-2 :</b> Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	18
<b>Figure II-3:</b> Cellule, module, panneau et champ photovoltaïque.....	19
<b>Figure II-4 :</b> Les différentes zones de la caractéristique I (V) .....	20
<b>Figure II-5 :</b> Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température....	21
<b>Figure II-6 :</b> Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.	21
<b>Figure II-7 :</b> Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonction de la température.	21
<b>Figure II-8 :</b> Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	22
<b>Figure II -9 :</b> Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement..	22
<b>Figure I-10:</b> Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonction de l'éclairement...	23
<b>Figure II.11:</b> Influence de résistance série sur la caractéristique courant-tension.....	24
<b>Figure II.12 :</b> Influence de résistance série sur la caractéristique puissance-tension.....	24
<b>Figure II.13 :</b> Influence de résistance parallèle sur la caractéristique courant-tension.....	25
<b>Figure II.14:</b> Influence de résistance parallèle sur la caractéristique puissance-tension.....	25

<b>Figure III.1</b> : Le convertisseur BOOST.....	28
<b>Figure III.2</b> : Diagramme BOOST en position 1 et diagramme BOOST en position 2.....	28
<b>Figure III.3</b> : Signaux typiques de convertisseur BOOST.....	29
<b>Figure III.4</b> : Ondulation du courant.....	30
<b>Figure III.5</b> : ondulation de tension.....	31
<b>Figure III.6</b> : schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST.....	33
<b>Figure III.7</b> : Tensions de sortie du convertisseur BOOST.....	33
<b>Figure III.8</b> : courant de sortie du convertisseur BOOST.....	34
<b>Figure III.9</b> : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.....	35
<b>Figure III.10</b> : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	35
<b>Figure III.11</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.....	37
<b>Figure III.12</b> : Principe de la première commande MPPT numérique.....	38
<b>Figure III.13</b> : Schéma de converge vers le PPM par P&O.....	39
<b>Figure III.14</b> : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O .....	39
<b>Figure III.15</b> : schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).....	40
<b>Figure IV.1</b> : Schéma bloc d'un photovoltaïque muni de la MPPT.....	41
<b>Figure IV.2</b> : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	42
<b>Figure IV.3</b> : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....	42
<b>Figure IV.4</b> : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.....	43
<b>Figure IV.5</b> : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.....	43
<b>Figure IV.6</b> : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	44
<b>Figure IV.7</b> : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....	44
<b>Figure IV.8</b> : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.....	45
<b>Figure IV.9</b> : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.....	45
<b>Figure IV.10</b> : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	46

<b>Figure IV.11</b> : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.....	46
<b>Figure IV.12</b> : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.....	47
<b>Figure IV.13</b> : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.....	47



## Liste des nomenclatures :

**PV** : Photovoltaïque.

**MPPT**: Maximum power point tracker.

**CdTe** : Tellurure de cadmium.

**CIS** : Séléniure de cuivre et d'indium.

**GaAs** : Arséniure de gallium.

**P** : Positive.

**N** : Négative.

**PN** : Positive-négative.

**$i_{cell}$**  : Le courant de la cellule.

**$v_{cell}$**  : La tension de la cellule.

**EVA** : Ethylène-Acétate de Vinyle.

**UV** : Ultraviolet.

**$P_c$**  : La puissance de crête.

**I** : Courant.

**$V_{co}$**  : Tension à vide.

**$I_{cc}$**  : Courant de court-circuit.

**$I_{ph}$**  : Photo-courant.

**$P_m$**  : Point de fonctionnement optimum.

**E** : L'éclairement absorbé par la cellule.

**$E_{réf}$**  : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>).

**$I_0$**  : Courant de saturation inverse de la diode.

**$V_t$**  : Tension thermique.

**N** : Facteur d'idéalité de la photopile.

**K** : Constant de Boltzmann (1,38.10<sup>-23</sup>J/K).

**q** : Charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C).

**R<sub>sh</sub>** : Résistance shunt.

**R<sub>s</sub>** : Résistance série.

**I<sub>d</sub>** : Courant direct.

**I<sub>p</sub>** : Courant des connexions parallèles.

**S** : Le courant de saturation de diode.

**T** : La température effective de la cellule en Kelvin.

**J** : Le courant fourni par la cellule.

**V** : La tension à la borne de la cellule.

**A** : Le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ).

**GPV** : Générateur photovoltaïque.

**PPM** : Point de puissance maximale.

**I<sub>opt</sub>** : Courant de point de puissance maximale.

**V<sub>opt</sub>** : Tension de point de puissance maximale.

**DC** : Courant continu.

**AC** : Courant alternative.

**P&O**: Perturb-and-Observe.

**V** : Tension aux bornes du générateur(V).

**V<sub>s</sub>** : Tension de sortie du convertisseur(V).

**T** : Période de découpage du signal de l'interrupteur  $T = \frac{1}{f_p}$  en secondes (s).

**I<sub>Lmin</sub>** : Courant minimum dans l'inductance(A).

**I<sub>Lmax</sub>** : Courant maximum dans l'inductance(A).

**$\Delta I_L$**  : Ondulation de courant dans l'inductance(A).

**L** : Valeur de l'inductance de lissage (H).

**$\alpha$**  : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur  $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$ .

**C** : Valeur du condensateur de filtrage(F).

**$V_s$ min** : Tension minimum aux bornes de condensateur(V).

**$V_s$ max** : Tension maximum aux bornes de condensateur(V).

**$\Delta V_s$**  : Ondulation de tension aux bornes de condensateur(V).

**CS** : Convertisseur statique.

**I<sub>ph</sub>** : Courant délivré par le panneau photovoltaïque.

**V<sub>ph</sub>** : Tension délivré par le panneau photovoltaïque.

**IncCond** : Incrément de conductance.

**P<sub>pvn</sub>** : la nouvelle puissance.

**P<sub>pvn-1</sub>** :L'enceint puissance dans le temps (t-1).

**G** : Eclairment, irradiation.

# SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des nomenclatures

Introduction Générale..... 1

## **Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque**

Introduction :..... 3

I-2 les ressources des énergies renouvelables :..... 3

    I-2-1 Définition d'énergie renouvelable :..... 4

I-3 L'énergie solaire :..... 5

    I-3-1 les types d'énergie solaire :..... 5

        I-3-1-1 L'énergie solaire photovoltaïque :..... 5

        I-3-1-2 L'énergie solaire thermique :..... 6

        I-3-1-3 L'énergie solaire thermodynamique :..... 6

    I-3-2 Rayonnement solaire :..... 6

    I-3-3 Spectre solaire :..... 6

        ➤ Le rayonnement direct :..... 6

        ➤ Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :..... 6

        ➤ Le rayonnement global :..... 6

    I-3-4 Durée d'insolation :..... 7

I-4 Description des éléments d'un système photovoltaïque :..... 7

    I-4-1 Historique :..... 7

        I-4-1-1 Constitution de la cellule photovoltaïque :..... 8

        I-4-1-2 Synthèse des cellules photovoltaïques :..... 8

            ➤ Cellules monocristallines :..... 8

            ➤ Cellules poly-cristallines :..... 9

            ➤ Cellules amorphes :..... 9

        I-4-1-3 Principe de fonctionnement d'une cellule :..... 10

    I-4-2 L'effet photovoltaïque :..... 11

I-5 Le module photovoltaïque :..... 11

    I-5-1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque :..... 12

I-6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :..... 12

    I-6-1 Cas d'une cellule idéale :..... 12

I-6-2 Cas d'une cellule réelle :	13
I-7 Générateur photovoltaïque :	14
I-7-1 Constitution d'un générateur photovoltaïque :	14
I-7-2 Association des cellules photovoltaïque :	15
➤ Association en série :	15
➤ Association Parallèle :	15
➤ Association mixte (Série + Parallèle) :	15
I-8 Avantages et inconvénients d'une installation PV:	15
I-8-1 Avantages :	15
I-8-2 Inconvénients :	15
I-9 Conclusion :	16

## **Chapitre II : Modélisation d'un système photovoltaïque**

II-1 Introduction :	17
II-2 Principe de conversion photovoltaïque :	17
II-3 Principe de fonctionnement :	17
II-4 La structure de la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque :	18
II-4-1 Panneaux solaires (générateur PV) :	18
II-4-1-1 Implantation du champ de modules :	19
➤ L'orientation du champ de modules :	19
➤ L'inclinaison des modules :	19
➤ L'ombre portée sur le champ de modules :	19
➤ La distance module – batteries :	19
II-4-1-2 Zones de fonctionnement du module solaire :	19
➤ La zone (1-2) :	19
➤ La zone (2-3) :	20
➤ La zone (3-4) :	20
II-5 Influence de la température et de l'éclairement :	20
II-5-1 Influence de la température :	20
II-5-2 Influence de l'éclairement :	22
II-5-3 Influence de résistance série :	23
II-5-4 Influence de la résistance shunt :	24
II-6 Conclusion :	26

### **Chapitre III : Description générale d'un système de conversion photovoltaïque**

III-1 Introduction :.....	27
III-2 Introduction d'un étage d'adaptation :.....	27
III-3 Le Convertisseurs DC-DC :.....	28
III-3-1 Le Principe de fonctionnement d'un hacheur BOOST :.....	28
III-3-2 Détermination des paramètres du hacheur Boost : .....	30
➤ Calcul de l'inductance L .....	30
➤ Calcul du condensateur C .....	31
III-4 Simulation du hacheur parallèle : .....	32
III-5 Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque :.....	34
III-6 Principe de la recherche du point de puissance maximal : .....	35
III-6-1 Généralités : .....	35
III-7 Gestion de la MPPT :.....	36
III-8 Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature :.....	37
III-8-1 Les premiers types de commande MPPT : .....	37
III-8-2 Les commande MPPT à algorithmes performants :.....	38
III-9 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O) :.....	38
III-9-1 Le bloc de Simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O) : .....	40
III-10 Conclusion : .....	40

### **Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK**

IV-1 Introduction : .....	41
IV-2 Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC :.....	41
IV-2-1 Résultats de la simulation à la sortie du générateur photovoltaïque : .....	42
IV-2-2 Résultats à la sortie du convertisseur :.....	43
IV-2-3 Interprétation des résultats :.....	43
IV-3 Influence de l'éclairement : .....	44
IV-3-1 Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque : .....	44
IV-3-2 Résultats à la sortie du convertisseur :.....	45
IV-3-3 Interprétation des résultats :.....	45
IV-4 Influence de la température : .....	46
IV-4-1 Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque : .....	46
IV-4-2 Résultats à la sortie du convertisseur :.....	47

IV-4-3 Interprétation : .....	48
IV-5 Conclusion : .....	48
Conclusion générale .....	49
Références Bibliographiques	

# Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus, ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [1] [2].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, inépuisables et facilement exploitables. En effet, le secteur des énergies renouvelables est le seul qui se distingue par sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution et à exploiter des sources d'énergie locales et décentralisées. [3]

Le soleil fournit une énergie lumineuse grandiose à la Terre. Mais le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire [3].

De nombreux chercheurs se sont attachés à inventer des systèmes permettant de récupérer toujours le maximum d'énergie : c'est le principe nommé maximum power point tracker (MPPT) qui est le point le plus essentiel de notre travail.

L'objectif de ce mémoire est l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. De ce fait, le présent travail est décomposé en quatre parties séquentielles, dont chacune d'elle définit un chapitre.

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur le système photovoltaïque. En commençant par les ressources des énergies renouvelables en basant sur l'énergie solaire et les types de cette énergie. Ainsi des notions sur le rayonnement. Dans deuxième temps nous montrons les éléments d'un système photovoltaïque et l'effet photovoltaïque, ensuite on va montrer la modélisation d'une cellule photovoltaïque. Et nous finissons ce chapitre par les avantages et inconvénients d'une installation PV.



Le deuxième chapitre présente le principe de fonctionnement de conversion photovoltaïque aussi bien la simulation de la collection photovoltaïque. Enfin on va montrer l'influence de la température, l'éclairement, la résistance série et shunt sur le rendement.

Dans le troisième chapitre nous présentons les différentes techniques pour suivre et optimiser la puissance maximale et les différents types des convertisseurs statiques utilisés dans le système photovoltaïque et leur principe du fonctionnement.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous présentons une simulation complète avec et sans optimisation d'un système photovoltaïque alimentant un moteur a courant continue. En fin nous terminerons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉ SUR LE SYSTÈME**  
**PHOTOVOLTAÏQUE**

## I-1 Introduction :

La terre reçoit du soleil, sous forme de lumière, une énergie égale à 7000 fois la consommation de l'humanité. Cette lumière peut être décrite comme une myriade de petits paquets d'énergie appelés les photons. Donc l'énergie solaire pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [4].

Le solaire poursuivra ses bienfaits sur terre pendant encore des milliards d'années. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

**Photos** : Lumière.

**Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Ce phénomène fut découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954 pour l'alimentation en énergie des satellites. Depuis 1958, les cellules photovoltaïques alimentent seulement le système énergétique des satellites jusqu'à ses premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque fut utiliser pour l'alimentation en énergie de petites maisons isolées et d'équipements de télécommunications [5].

Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque, Le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différents modèles.

Une fois ces rappels théoriques sont faits, il nous sera facile d'expliquer le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [6].

## I-2 les ressources des énergies renouvelables :

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelable [6].

Au niveau mondial, les énergies renouvelables représentent 13% de l'énergie primaire. Le terme énergie renouvelable est employé pour désigner des énergies qui, à l'échelle humaine au moins, sont inépuisables et disponibles en grande quantité. Il existe cinq grands types d'énergies renouvelables : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas produire, en phase d'exploitation, d'émissions polluantes (ou peu), et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique. On les appelle « renouvelables » par opposition aux combustibles fossiles dont les stocks sont limités [4].

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [6].

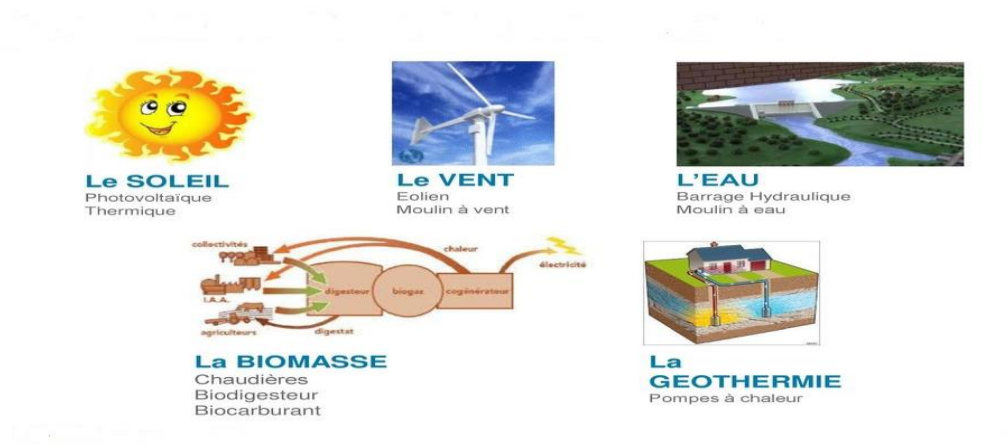


Figure I.1 : Les cinq grands types d'énergies renouvelables.

**I-2-1 Définition d'énergie renouvelable :**

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables, réutilisables elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... l'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir [5].



Figure I.2 : Les énergies renouvelables.

### **I-3 L'énergie solaire :**

Aujourd'hui, l'énergie solaire rime avec écologie. Les technologies permettant de mettre à profit les rayons du soleil pour en faire de l'énergie, ont énormément évolué ces dernières années. Le soleil est une source infinie d'énergie et dont nous pouvons bénéficier en abondance. Et ce, pour très longtemps ! Cette énergie passive est simplement captée par des panneaux solaires ou photovoltaïques [7].

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil.

Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable.

On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO<sub>2</sub>.

Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité [7].

Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité.

C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque : lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. Ces derniers génèrent un courant électrique continu qui sera converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur.

Cette électricité produite peut être immédiatement employée pour faire fonctionner vos appareils ou vous éclairer [7].

Toute installation solaire requiert trois éléments permettant d'assurer la récupération des rayons transmis par le soleil, pour ensuite les transformer en électricité et les distribuer :

- Une installation de type panneaux photovoltaïques ;
- Un onduleur permettant de convertir l'électricité obtenue en courant alternatif ;
- Un compteur servant à comptabiliser la quantité de courant ainsi produite et distribuée [7].

#### **I-3-1 les types d'énergie solaire :**

##### **I-3-1-1 L'énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue par l'énergie des rayonnements du soleil. C'est la raison pour laquelle les panneaux photovoltaïques qui vont les récolter, se trouvent installés sur les toits, avec la meilleure orientation possible [7].

Le but est qu'ils soient exposés un maximum aux rayonnements du soleil, pour récolter les photons du soleil, et en faire ensuite de l'électricité.

La composition des panneaux solaires est conçue de telle sorte que la superposition des couches, chargées négativement ou positivement, produit une tension électrique quand un photon les traverse. Un fil raccordé à une borne positive et un autre à la borne négative, un peu à l'image d'une pile, permet de mettre à profit l'énergie ainsi produite [7].

##### **I-3-1-2 L'énergie solaire thermique :**

Les panneaux solaires thermiques contiennent des fluides caloporteurs. Une fois qu'ils sont chauffés par le soleil, les fluides commencent à chauffer le ballon d'eau chaude.

L'énergie solaire thermique sert aussi bien pour alimenter :

- Un chauffage solaire.
- Un chauffe-eau.
- Une cuisinière [7].

### **I-3-1-3 L'énergie solaire thermodynamique :**

L'énergie solaire thermodynamique est produite via des centrales solaires à concentration. Il s'agit d'un assemblage de miroirs contenant des fluides caloporteurs, couplés à un générateur d'électricité solaire.

À l'image des panneaux solaires thermiques, ce sont les miroirs qui transforment l'énergie collectée par les rayons du soleil, en chaleur.

Cette chaleur a une température très élevée. Bien supérieure à la température à laquelle elle a été collectée. Elle peut aller de 250 à 800 degrés selon la technique employée.

Cette chaleur sera convertie en électricité au moyen d'un turbo-alternateur [7].

### **I-3-2 Rayonnement solaire :**

En tant que source d'énergie, l'ensoleillement est un facteur climatique dont on a intérêt à tirer parti (de manière passive, via les ouvertures vitrées, et/ou de manière active pour produire de l'énergie) mais dont on doit aussi parfois se protéger pour éviter les surchauffes en été.

La maîtrise de l'énergie solaire nécessite donc de connaître la position correcte du soleil (hauteur et azimut) ainsi que l'intensité du rayonnement à tout moment [8].

### **I-3-3 Spectre solaire :**

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature [5].

#### **➤ Le rayonnement direct :**

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre [6].

#### **➤ Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :**

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...) [5].

#### **➤ Le rayonnement global :**

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la Figure ci-dessous figure est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre [9].

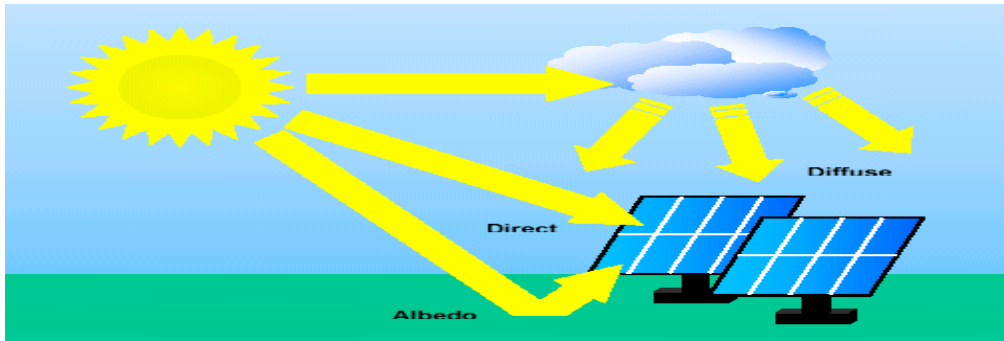


Figure I.3 : Types de rayonnement solaire reçus au sol [9].

### I-3-4 Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell-Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages [10].

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle-même dépend de la période de l'année considérée [10].

## I-4 Description des éléments d'un système photovoltaïque :

### I-4-1 Historique :

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à 1839, l'année où le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre la possibilité de produire de l'électricité grâce à la lumière et la présence de matériaux semi-conducteurs comme le silicium [11].

Après 1913, naissent les premières cellules photovoltaïques, mais ce n'est qu'en 1916 que Robert Millikan parvient à produire un courant continu [11].

Le premier véritable panneau solaire, avec un rendement de 6%, est développé en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell.

Les panneaux solaires sont nés, mais sont encore trop coûteux. La recherche spatiale s'empare du sujet afin d'équiper ses satellites qui ont besoin d'une énergie durable. Suite à la prouesse des laboratoires Bell, qui étaient parvenus à un rendement de 6%, la recherche progresse jusqu'à obtenir un rendement de 9%. En 1958, les premières cellules voyagent à bord du satellite Vanguard 1. Puis c'est au tour des premiers panneaux solaires, fixés sur le satellite Explorer 6, en 1959 [11].

La recherche continue son travail afin de pouvoir adapter les panneaux solaires à une utilisation terrestre. L'Université Delaware est à l'origine de la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques en 1973.



Plusieurs paramètres font de l'énergie solaire une ressource de plus en plus sollicitée : l'augmentation du coût des énergies fossiles et la prise de conscience liée à l'épuisement des ressources naturelles en font partie. L'usage domestique des panneaux solaires se développe davantage d'année en année [11].

#### I-4-1-1 Constitution de la cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques sont constituées [12] :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [12].

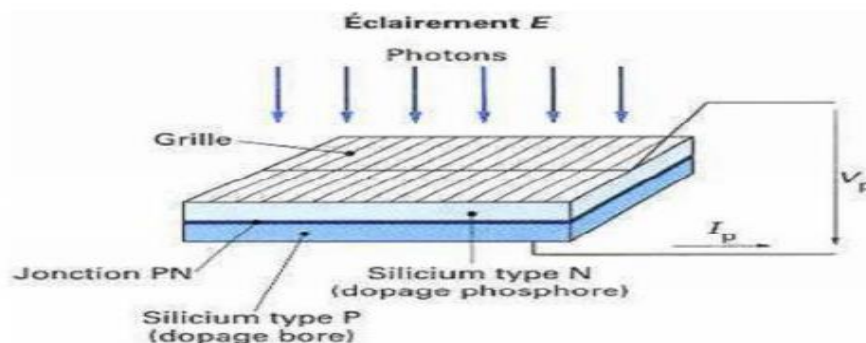


Figure I.4 : Constitution d'une cellule photovoltaïque.

#### I-4-1-2 Synthèse des cellules photovoltaïques :

Pour les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV en raison essentiellement de sa disponibilité et de la connaissance acquise sur son comportement électrique. Il est utilisé, pour cela, sous de nombreuses formes (monocristallin, poly cristallin, amorphe, en couche mince,...), en fonction des performances recherchées [13].

##### ➤ Cellules monocristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Ce type de cellule présente le plus haut pouvoir de conversion. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22% [13].



Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque [13].

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

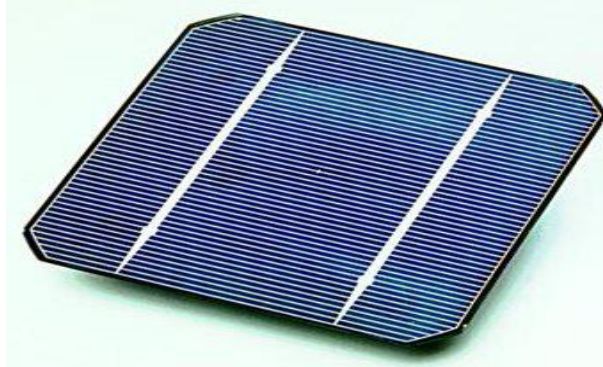


Figure I.5 : Cellule solaire au silicium monocristallin [13].

➤ **Cellules poly-cristallines :**

Les cellules poly cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux, ce qui diminue leur prix de fabrication. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme.

Le silicium poly cristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. Elle représente près de 50% du marché [13].

Les cellules poly cristallines est caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 et jusqu'à 20% en labo (moins bonne que le monocristalline).

Les inconvénients des cellules poly-cristallines sont les même que le monocristalline.

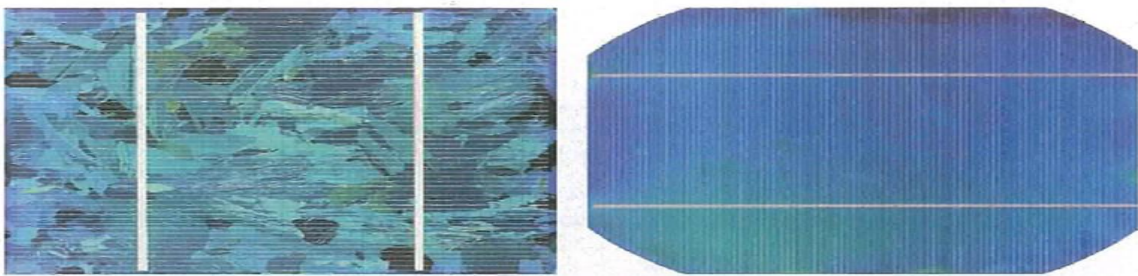


Figure I.6 : Cellules poly-cristallines [13].

➤ **Cellules amorphes :**

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin.

Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) [13].

- Coût de production bien plus.

- Rendement de seulement 5% par module et de 14% au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclairement.
- Elles sont moins chères.

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le di sélénure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des rendements de 38% au laboratoire [13].

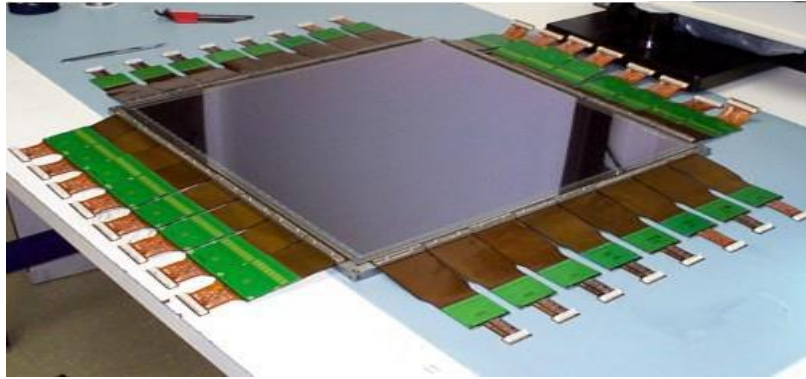


Figure I.7 : Cellules Couche mince (Amorphe) [13].

#### I-4-1-3 Principe de fonctionnement d'une cellule :

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Dans la majorité des cas, la cellule photovoltaïque est en effet fabriquée à partir de deux couches de silicium (matériau semi-conducteur) [14].

- Une couche dopée avec du Bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P). Elle est couverte d'une plaque qui joue le rôle d'anode.
- Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N). Elle est couverte d'une plaque qui joue le rôle de cathode.

En mettant en contact ces deux plaques polarisées, on obtient une jonction PN (Positive-négative). Le fait de créer une telle jonction, fait apparaître un champ électrique interne [14].

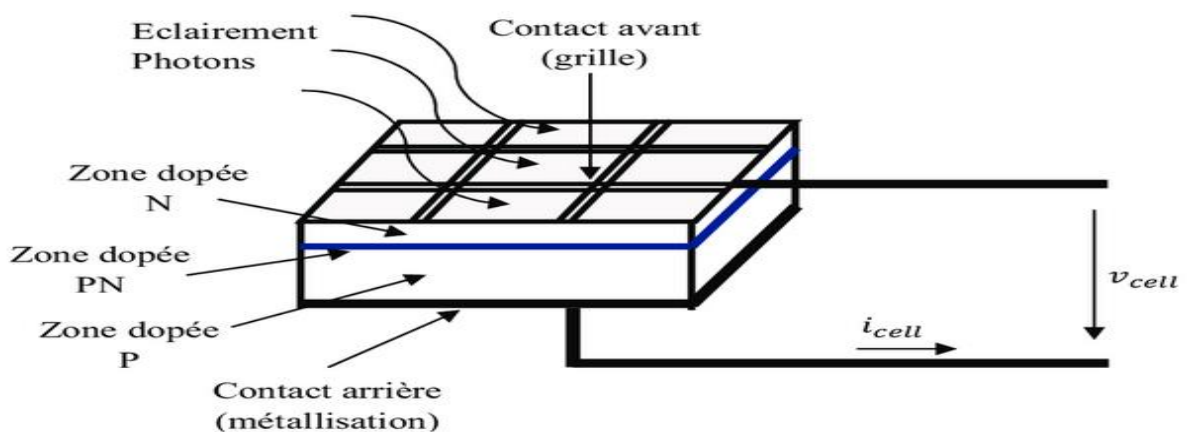


Figure I.8 : La jonction PN.

$i_{cell}$  : le courant de la cellule.

$v_{cell}$  : la tension de la cellule.

#### I-4-2 L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt [13].

L'effet photovoltaïque est un des effets photoélectriques. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire.

C'est le produit du choc des photons de la lumière sur un matériau semi-conducteur qui transmet leur énergie aux électrons qui génèrent une tension électrique [13].

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques [13].

#### I-5 Le module photovoltaïque :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt (0,6 V). Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module ou panneau. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant [13].

La mise en parallèle des cellules accroît le courant en conservant la tension. Les cellules sont connectées entre elles par des fins rubans métalliques, des contacts en face avant (-) au contact en face arrière (+).

Pour obtenir une tension électrique générée qui soit utilisable, on raccorde plusieurs cellules en série qui forment alors un string. Un module est composé de plusieurs strings [13].

L'association des cellules en modules permet :

- D'obtenir une tension suffisante
- De protéger les cellules et leurs contacts métalliques de l'ambiance extérieure (humidité,...)
- De protéger mécaniquement les cellules (chocs,...)

Les modules les plus courants (communément appelés panneaux) sont généralement constitués :

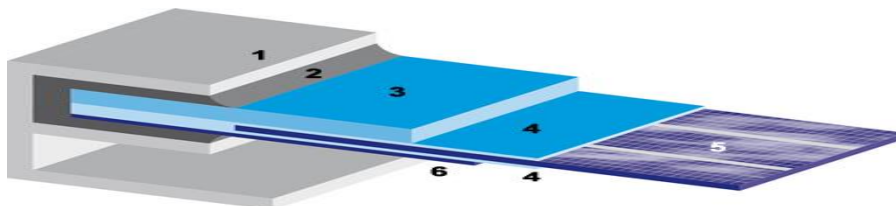


Figure I-9 : Constitution du module photovoltaïque.

- D'un cadre de support et un joint d'étanchéité **(1 et 2)**.
- D'une plaque de verre extra claire (favorisant la transmission lumineuse) **(3)**.
- De deux couches d'Éthylène-Acétate de Vinyle (EVA) qui enrobent les cellules assurant leur protection contre les intempéries et l'humidité. **(4)**
- Des différents strings de cellules **(5)**.
- D'une feuille de tedlar (ou éventuellement du verre) comme face arrière du module. Ce polymère à haute résistance aux UV et à la haute température assure au module sa résistance mécanique face aux chocs externes (vent, transport,...) **(6)** [15].

### I-5-1 Caractéristiques d'un module photovoltaïque :

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (Quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes [6] :

- **La puissance de crête,  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).
- **La caractéristique  $I=f(V)$**  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide,  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum,  $P_m (V_m, I_m)$**  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_m \cdot I_m$
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$ .

### I-6 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

#### I-6-1 Cas d'une cellule idéale :

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la Figure I.10, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [5].



Figure I.10 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.

Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{I.1})$$

Le courant  $I_{ph}$  est assimilé au courant  $I_{sc}$  avec  $V_{pv} = 0$ , courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge [5].

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{réf}} \quad (\text{I.2})$$

$E$  : L'éclairement absorbé par la cellule ;

$E_{réf}$  : L'éclairement de référence (1000 w/m<sup>2</sup>) ;

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{I.3})$$

$I_0$  : Courant de saturation inverse de la diode ;

$$V = \frac{NKT}{q} \quad (\text{I.4})$$

$V_t$  : Tension thermique ;

$N$  : Facteur d'idéalité de la photopile ;

$K$  : Constant de Boltzmann (1,38.10<sup>-23</sup>J/K) ;

$q$  : Charge de l'électron (1,6.10<sup>-19</sup> C).

### I-6-2 Cas d'une cellule réelle :

Une cellule PV est une diode de grandes dimensions avec des caractéristiques de fabrication bien particulière, son illumination provoque la génération d'un photo-courant  $I_{ph}$ . En effet une partie de ce courant est dissipée dans la jonction selon l'équation simplifiée de la diode ce qui conduit au modèle simplifié de la cellule PV qui est équivalente à une source de courant avec une diode. Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération. Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la Figure I.11 par un générateur de courant  $I_{cc}$ , une diode et  $R_{sh}$  [16].

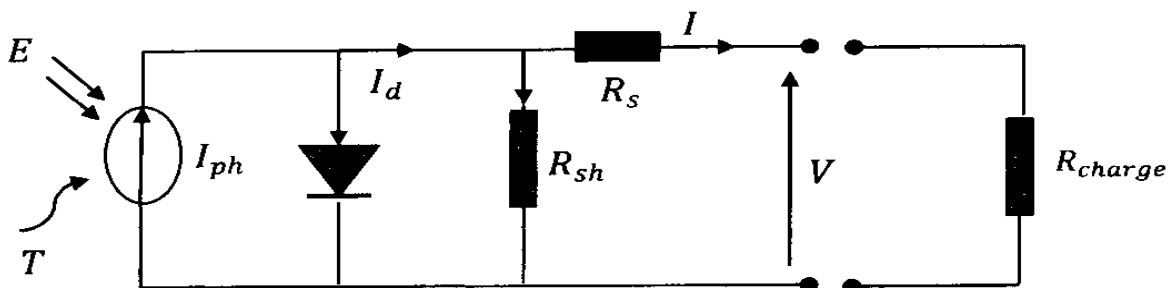


Figure I.11: Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.

$R_s$  : est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point  $V_{co}$  représente l'inverse de la résistance série ( $1/R_s$ ).

$R_{sh}$  : est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant-tension au point  $V_{cc}$  représente l'inverse de la résistance shunt ( $1/R_{sh}$ ).

Le photo-courant  $I_{ph}$  crée dans la structure par une partie de rayonnement absorbé (ce courant est pratiquement le courant de court-circuit de la cellule) [16].

- Le courant direct  $I_d$  d'obscurité de la jonction.
- Le courant  $J$  généré par la cellule et fourni à la charge.
- Le courant  $I_p$  correspond au courant des connexions parallèles.

Cet équilibre s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.5)$$

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans la figure on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (I.6)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V + IR_s}{AV_t}\right) - 1 \right) - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (I.7)$$

Avec:

$$V = \frac{KT}{q} \quad (I.8)$$

$I_{ph}$ : Le photo-courant produit,  $I_s$ : Le courant de saturation de diode,

$V_t$ : La potentielle thermodynamique,

$K$  : Constant de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{C}$ ),

$q$  : La charge de l'électron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ),

$T$  : La température effective de la cellule en Kelvin,

$J$  : Le courant fourni par la cellule,

$V$  : La tension à la borne de la cellule,

$A$  : Le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ) [16].

## I-7 Générateur photovoltaïque :

### I-7-1 Constitution d'un générateur photovoltaïque :

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV.

La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe



de cellules PV connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel. Nous pouvons remarquer que comme pour une cellule, la caractéristique électrique  $I(V)$  d'un GPV est non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Ce point a également un courant et une tension associés appelés  $I_{opt}$  et  $V_{opt}$  respectivement. Le point de fonctionnement d'un GPV est fonction de l'impédance de la charge qu'il alimente. Cette charge pourrait être une charge résistive ou un bus de tension continue (par exemple, connecté sur une batterie). Dans le cas d'une batterie, c'est elle qui impose le point de fonctionnement du GPV lors d'une connexion directe [17].

### **I-7-2 Association des cellules photovoltaïque :**

➤ **Association en série :**

L'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module [18].

➤ **Association Parallèle :**

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'un seul module [18].

➤ **Association mixte (Série + Parallèle) :**

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [18].

### **I-8 Avantages et inconvénients d'une installation PV:**

#### **I-8-1 Avantages :**

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [13].

#### **I-8-2 Inconvénients :**

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.

- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- tributaire des conditions météorologiques [13].

### **I-9 Conclusion :**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Les performances d'un module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le fonctionnement de la conversion photovoltaïque et la constitution de la chaîne de conversion.



**CHAPITRE II**

**MODÉLISATION D'UN SYSTÈME**

**PHOTOVOLTAÏQUE**

## II-1 Introduction :

Une cellule photovoltaïque (ou photopile) est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique.

Pour adapter la puissance électrique produite, il est nécessaire d'avoir un système constitué d'un générateur photovoltaïque et d'un ensemble de composants (convertisseur statique, batterie de stockage avec son régulateur de charge, câblage et protection) [5].

En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. Actuellement, l'objectif essentiel est devenu la production de l'électricité, sans pollution, pour l'alimentation des réseaux de distribution [5].

## II-2 Principe de conversion photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est une technologie qui exploite la lumière du soleil pour la convertir directement en électricité. Le principe est le suivant : la collision entre un photon et un matériau semi-conducteur génère des charges électriques positives et négatives qui engendrent un faible courant.

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium [19].

## II-3 Principe de fonctionnement :

Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P).

Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [5].

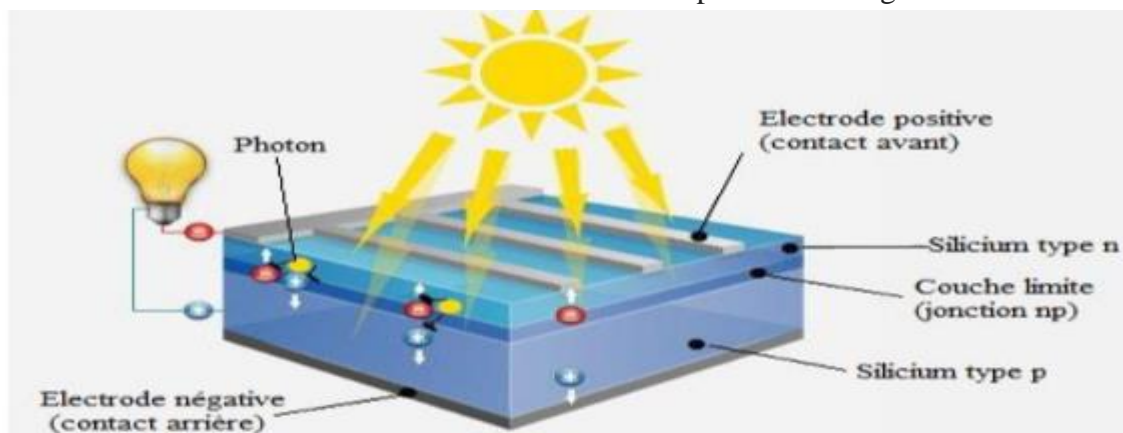


Figure II.1: Schéma d'une cellule solaire.

## II-4 La structure de la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque :

Notre chaîne de conversion photovoltaïque est composée de six panneaux photovoltaïques branchés en parallèle, qui jouent le rôle d'un générateur PV, et un convertisseur DC/DC à pilotage MPPT (hacheur Boost), ce système alimente une charge (Batteries). La structure de notre chaîne de conversion photovoltaïque est représentée dans la figure suivante [20].

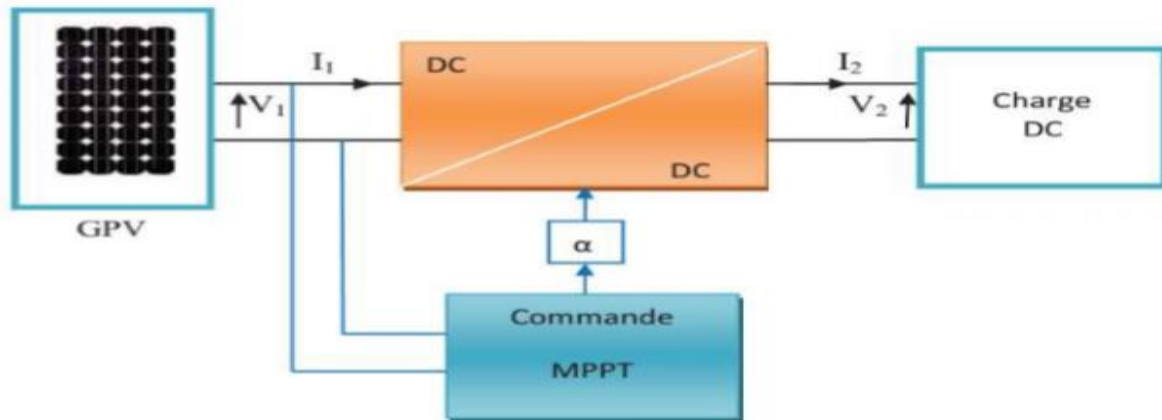


Figure II.2 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

### II-4-1 Panneaux solaires (générateur PV) :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène - vinyl- acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [6].

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules [21].

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs [21].

Les utilisations communes des générateurs photovoltaïques sont classiquement subdivisées en courant continu (12, 24 ou 48 Volts DC) et en courant alternatif produit par un convertisseur (230 Volts AC monophasé ou 380 Volts AC triphasé) [21].

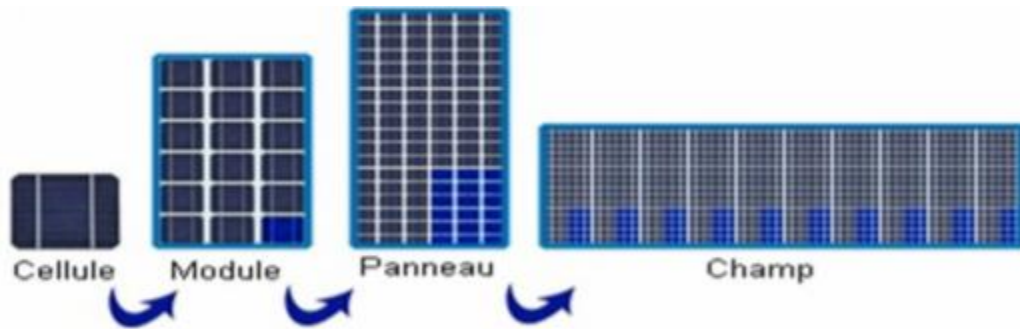


Figure II.3: Cellule, module, panneau et champ photovoltaïque.

#### II-4-1-1 Implantation du champ de modules :

Pour choisir l'implantation du panneau solaire, quatre éléments sont à considérer [22] :

➤ **L'orientation du champ de modules :**

Favoriser au maximum une orientation sud dans l'hémisphère Nord.

➤ **L'inclinaison des modules :**

En fonction de la période de fonctionnement de l'installation, il faudra favoriser soit le fonctionnement été (inclinaison de  $30^\circ$  sur l'horizontale) soit le fonctionnement hiver (inclinaison de  $60^\circ$ ) soit faire un compromis (inclinaison de  $45^\circ$ ).

➤ **L'ombre portée sur le champ de modules :**

Un relevé de profils d'ombre sur le site est primordial au démarrage du projet afin de contrôler la qualité de l'ensoleillement.

➤ **La distance module - batteries :**

En courant continu basse tension, les chutes de tension peuvent être importantes. Une distance importante entre les modules et la batterie peut rendre nécessaire la pose de câble de sections importantes (10 ou 16 mm<sup>2</sup> voire plus). Il faut donc limiter au maximum la distance entre le champ de modules et les usages en courant continu.

#### II-4-1-2 Zones de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe  $I_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure représente trois zones essentielles [23] :

➤ **La zone (1-2) :**

Où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

➤ **La zone (2-3) :**

Correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (caractéristique par une puissance maximale) peut être déterminé.

➤ **La zone (3-4) :**

Qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

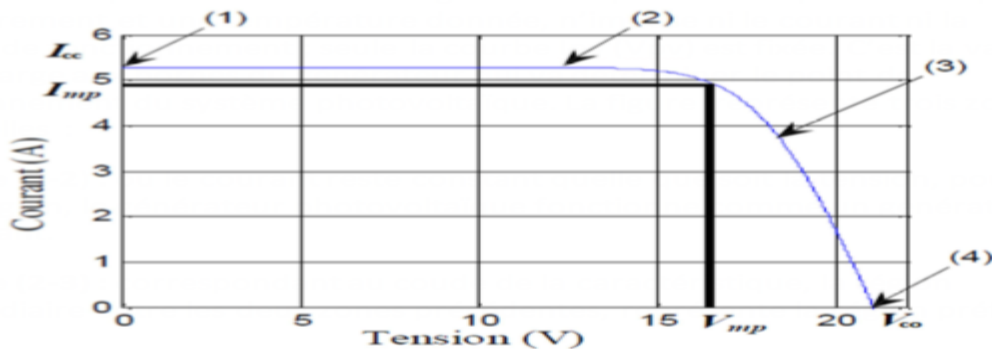


Figure II.4 : Les différentes zones de la caractéristique I (V) [23].

## II-5 Influence de la température et de l'éclairement :

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

### II-5-1 Influence de la température :

On aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 10°C à 75°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température. On aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV. Les graphes suivant représentent des courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante [24].

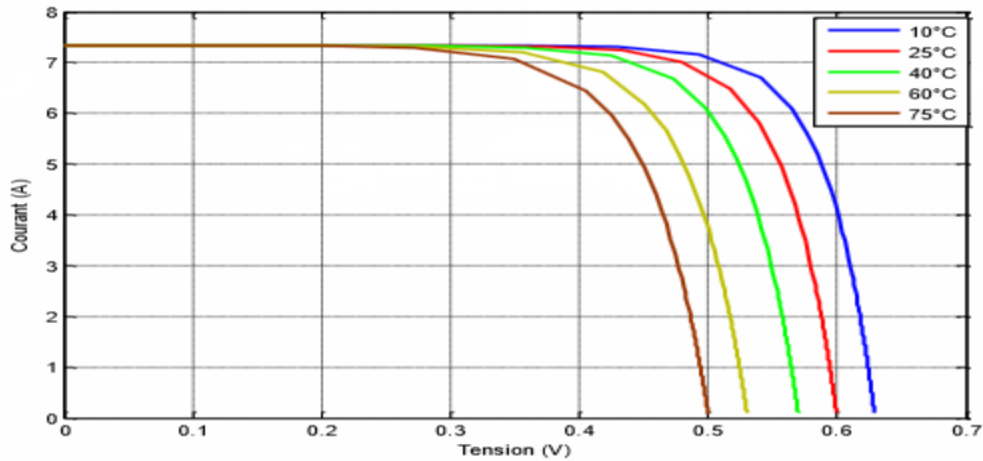


Figure II.5 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température [24].

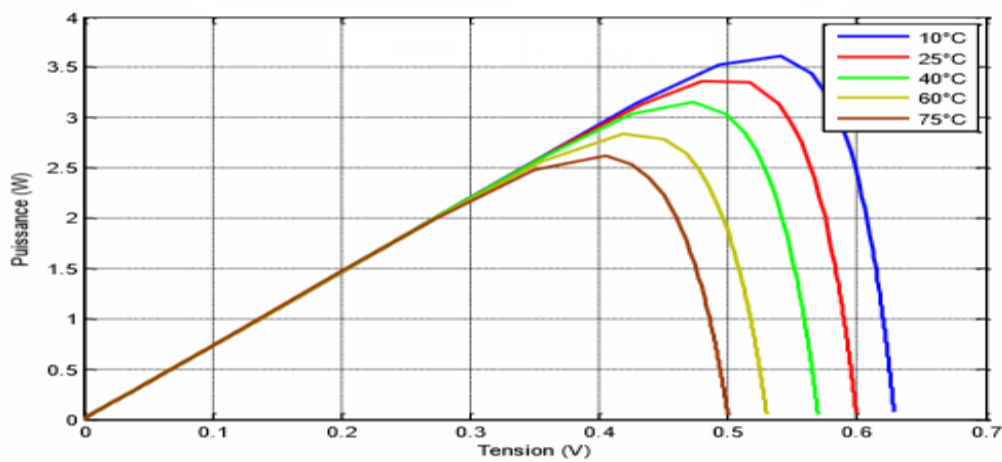


Figure II.6: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température [24].

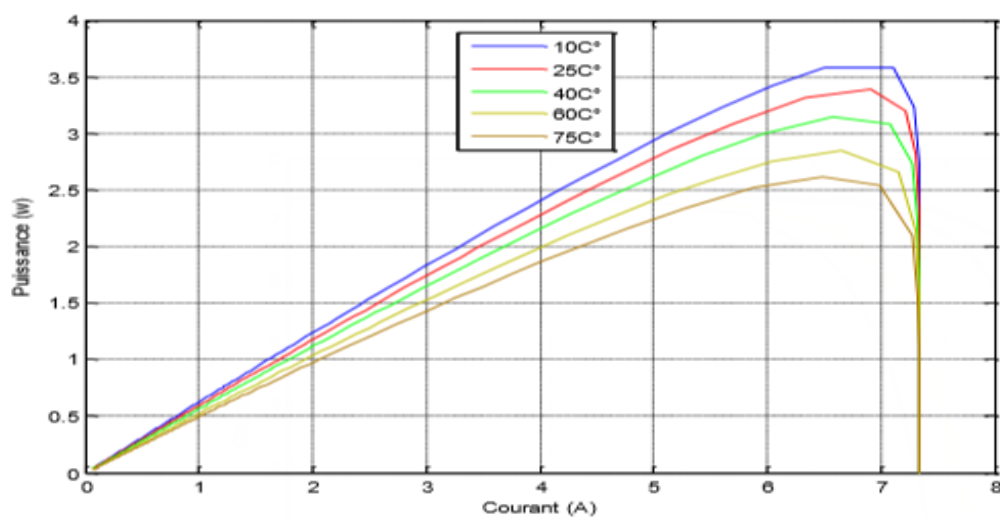


Figure II.7 : Caractéristique puissance-courant d'une cellule en fonction de la température [24].

### II-5-2 Influence de l'éclairement :

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

La Figure II.8 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [6].

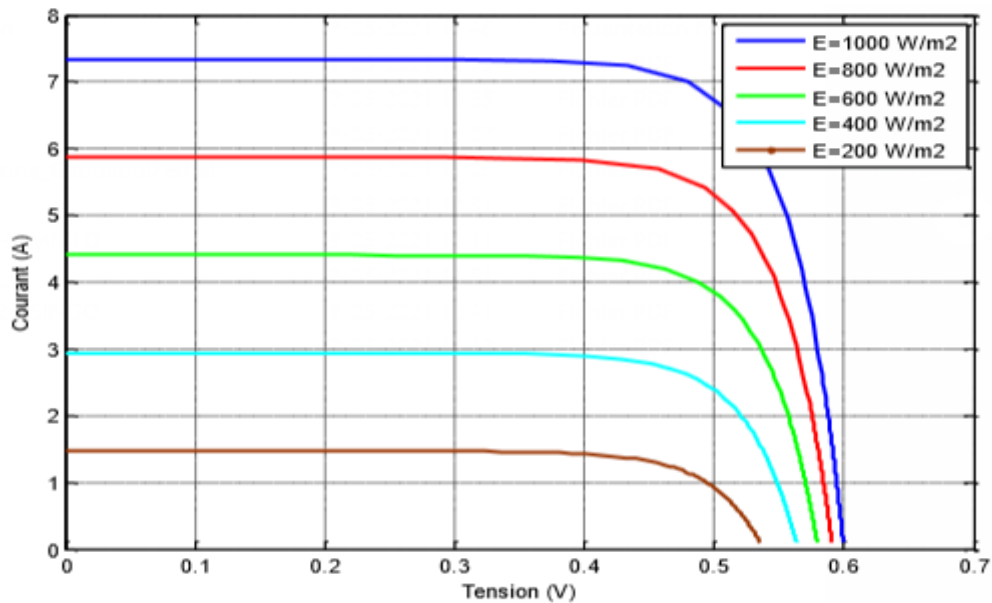


Figure II.8 : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement [6].

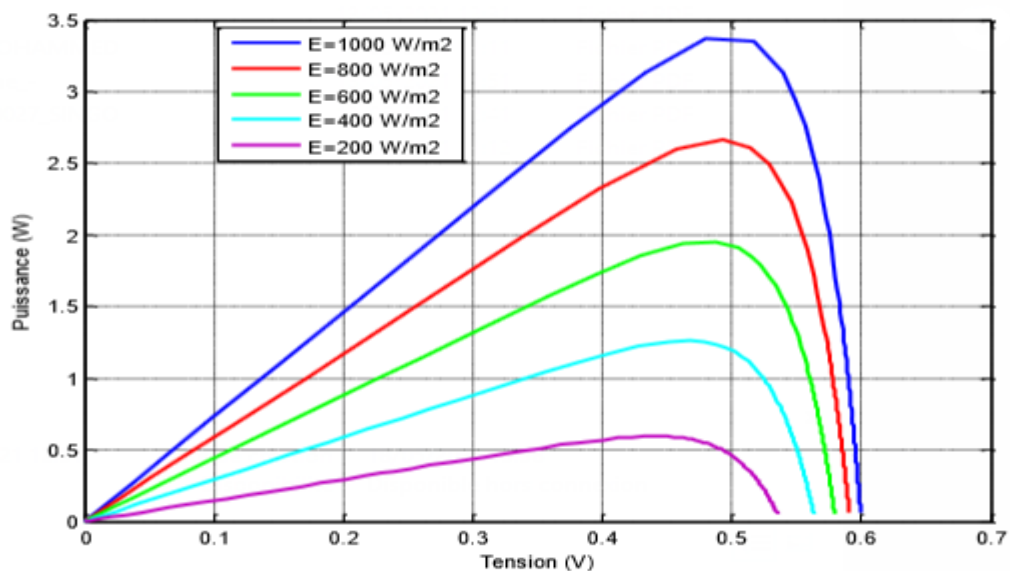


Figure II.9 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement [6].

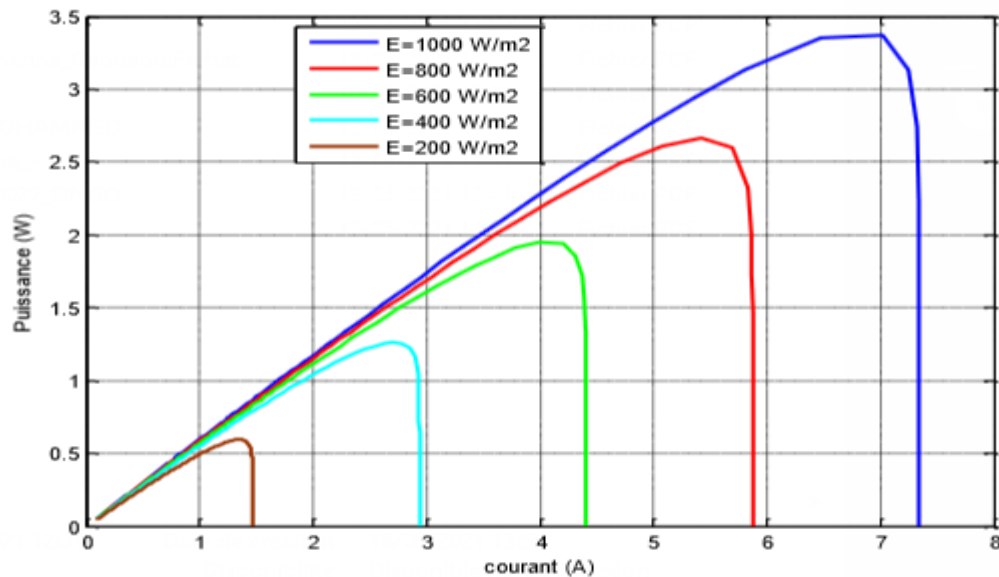


Figure II.10 : Caractéristique puissance- courant d'une cellule en fonction de l'éclairement [6].

### II-5-3 Influence de résistance série :

Les Figures II.11 et II.12 montrent l'influence de la résistance série sur la caractéristique  $I(V)$  et  $P(V)$  de la cellule photovoltaïque.

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension du circuit ouvert, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit [2].

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de pente de la courbe de puissance.



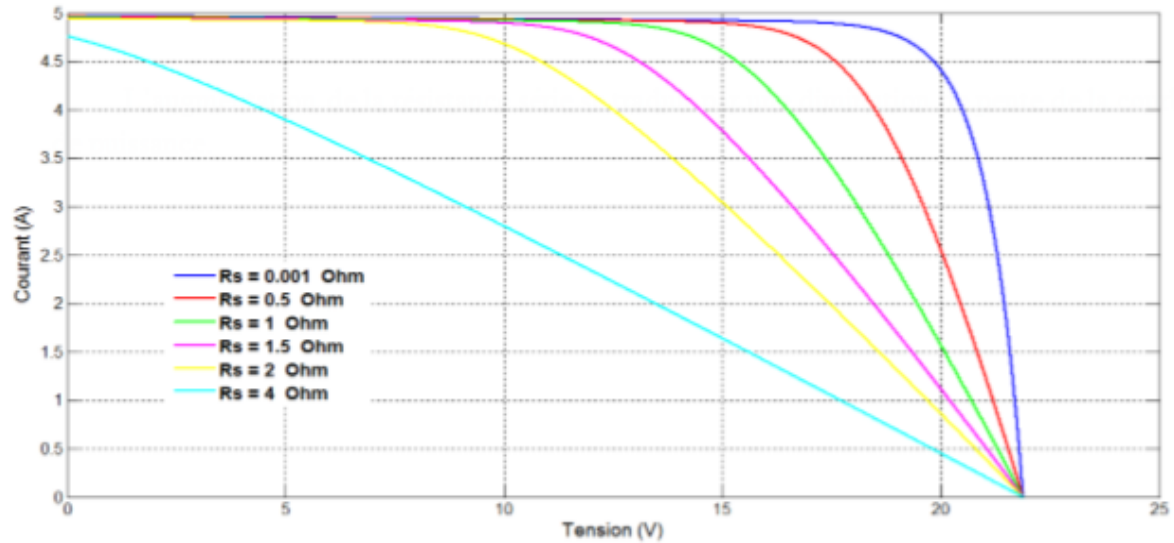


Figure II.11: Influence de résistance série sur la caractéristique courant-tension [2].

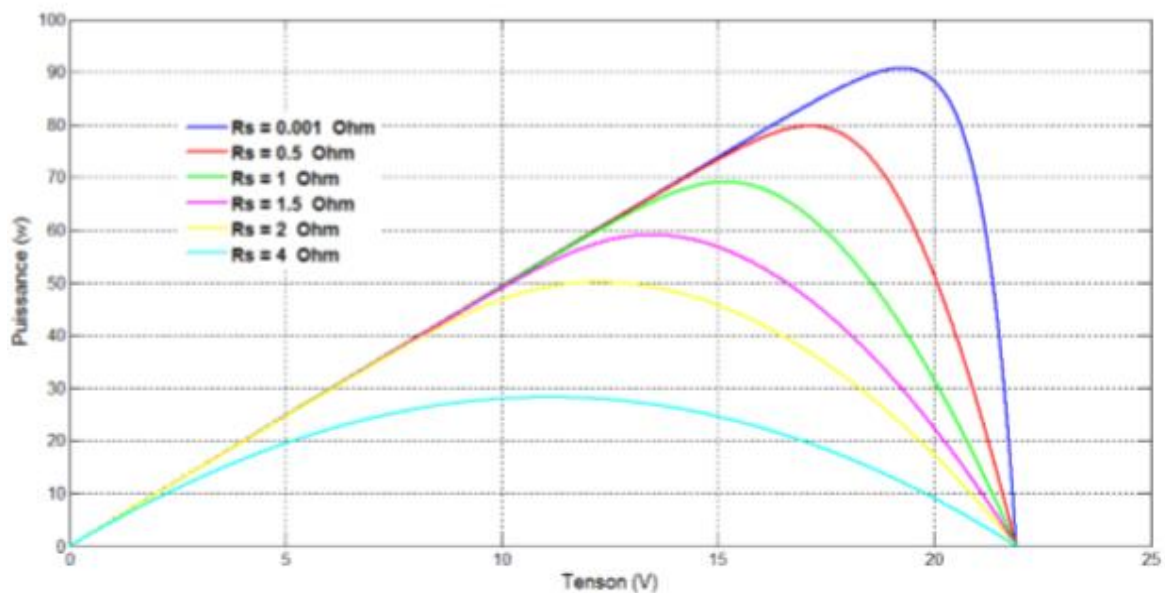


Figure II.12 : Influence de résistance série sur la caractéristique puissance-tension [2].

#### II-5-4 Influence de la résistance shunt :

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En générale, la résistance shunt est très élevée, son effet se fait sentir surtout dans la partie génération de courant [2].

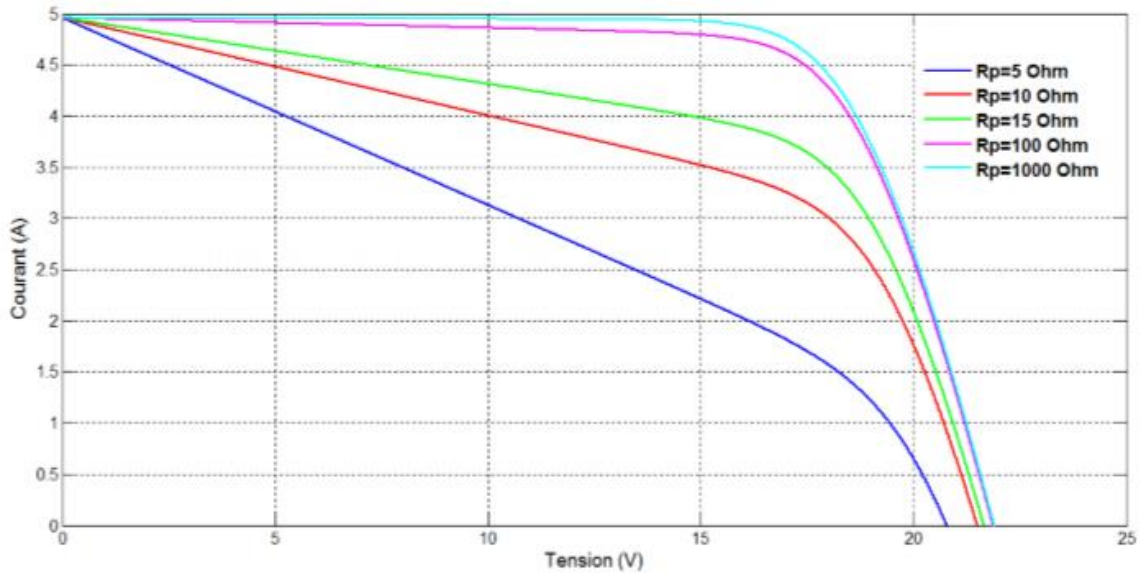


Figure II.13 : Influence de résistance parallèle sur la caractéristique courant-tension [2].

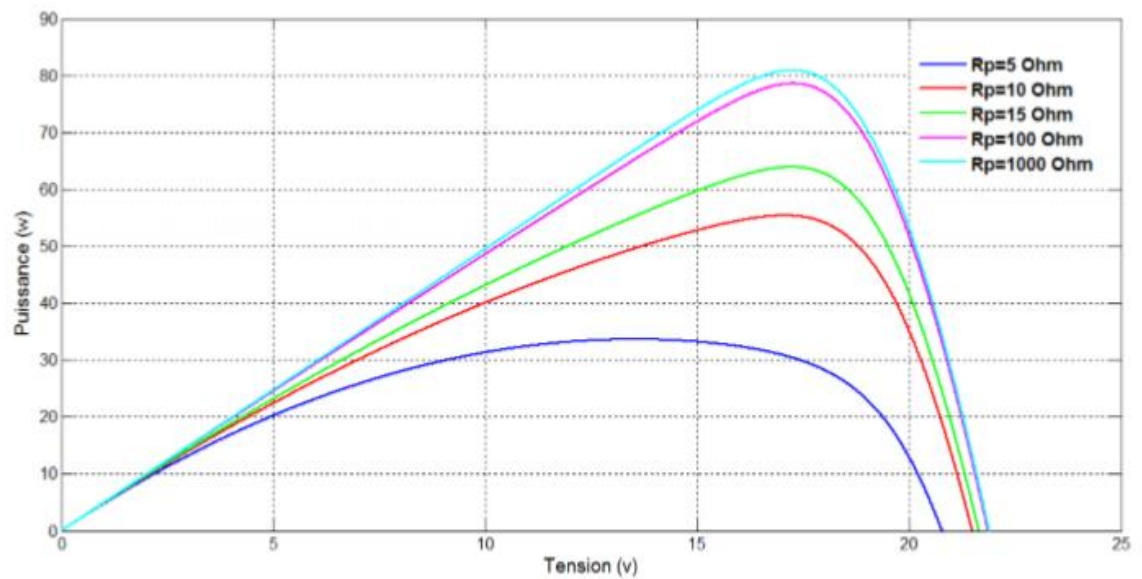


Figure II.14: Influence de résistance parallèle sur la caractéristique puissance-tension [2].

L'influence de la résistance parallèle (shunt) sur la caractéristique courant-tension se traduit par une légère diminution de la tension de circuit ouvert, et une augmentation de la pente de la courbe I-V de la cellule dans la zone correspondante à un fonctionnement comme une source de courant.

Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée. La puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, plus cette résistance est élevée plus la puissance fournie est importante [2].

**II-6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement de la conversion photovoltaïque ainsi la composition de la chaîne photovoltaïque.

Nous avons mentionné les éléments nécessaires pour choisir l'implantation du panneau solaire et les trois zones essentielles de fonctionnement du module solaire. L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

Alors nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter le concept et le rôle d'un étage d'adaptation qui relie aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC).

**CHAPITRE III**  
**DESCRIPTION GÉNÉRALE D'UN**  
**SYSTÈME DE CONVERSION**  
**PHOTOVOLTAÏQUE**

### III-1 Introduction :

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [5].

Le branchement d'une charge à un générateur photovoltaïque est le mode de couplage le plus simple qui soit. Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe [5].

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge [5].

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible [5].

Dans ce chapitre nous allons citer et expliquer la méthode du point de puissance maximale et en terminant par la méthode qui s'appelle 'perturbation et observation', (P&O : Perturb-and-Observe).

### III-2 Introduction d'un étage d'adaptation :

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et d'interrupteurs commandables. Tous ces dispositifs dans le cas idéal ne consomment pas de puissance (pertes de commutation et de conduction nulles).

Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [25].

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC nous citons :

- Convertisseur BUCK (hacheur série).
- Convertisseur BOOST (hacheur parallèle).
- Convertisseur BUCK-BOOST (hacheur série- parallèle).

Le présent travail est basé sur le convertisseur BOOST.

### III-3 Le Convertisseurs DC-DC :

Le convertisseur BOOST est connu par le nom d'élevateur de tension, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus forte. La Figure III.1 représente le schéma de base d'un convertisseur boost [2].

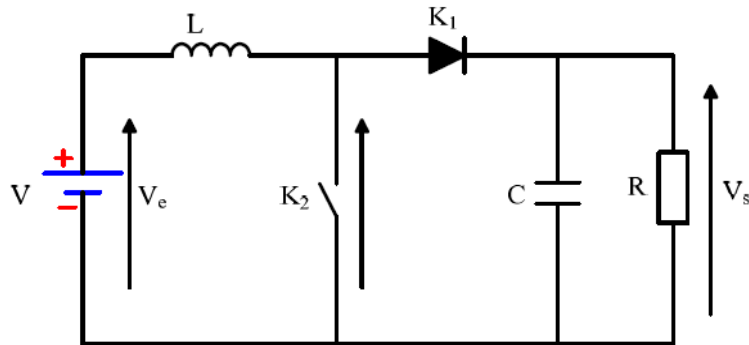


Figure III.1 : Le convertisseur BOOST.

#### III-3-1 Le Principe de fonctionnement d'un hacheur BOOST :

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur boost est divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur.

La Figure III.2 montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur survolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant  $\alpha T$  et l'interrupteur ouvert pendant  $(1 - \alpha) T$  [2].

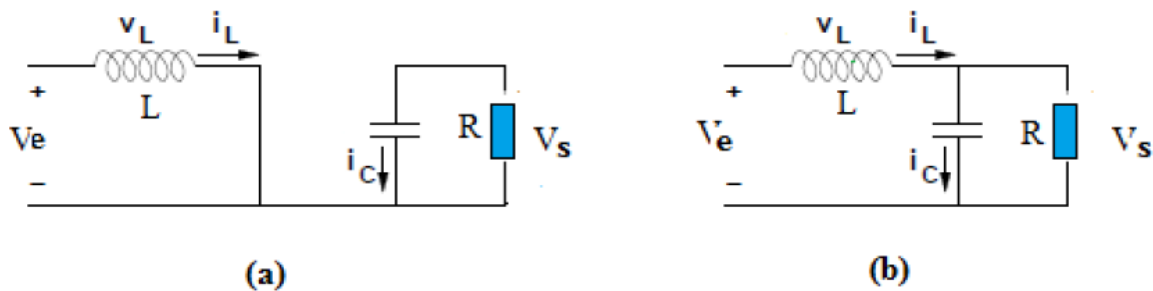


Figure III.2 (a) : Diagramme BOOST en position 1 et (b) : diagramme BOOST en position 2.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la Figure III.2, on obtient les systèmes d'équations suivants [2] :

- De  $[0 \text{ à } \alpha T]$  (état passant) : le MOSFET est en position 1, l'inductance stocke le courant provenant de la source et la capacité maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée. Pendant ce temps le courant  $i_L$  augmente suivant l'équation suivante : Pour la première période  $\alpha T$  :

$$V_e = V_L \quad (\text{III.1})$$

$$I_c = I_L = \frac{V_s}{R} \quad (\text{III.2})$$

- De  $[DT \text{ à } T]$  (état bloqué) : le MOSFET est en position 2, Lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption de courant dans l'inductance provoque une surtension qui s'ajoute à celle du condensateur.

$$V_L = V_e - V_s \quad (\text{III.3})$$

$$I_C = I_L - I_s = I_L - \frac{V_s}{R} \quad (\text{III.4})$$

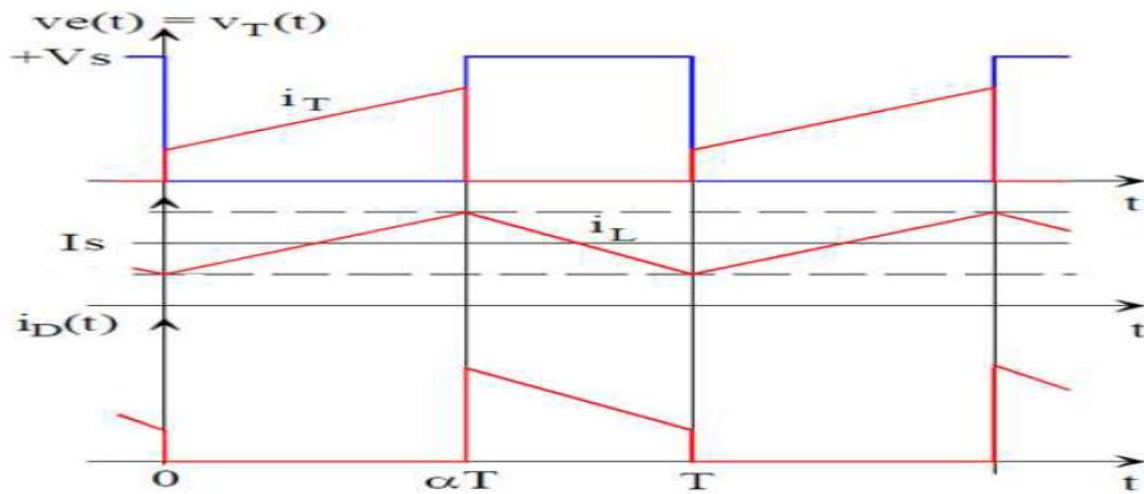


Figure III.3 : Signaux typiques de convertisseur BOOST.

Dans un convertisseur bien conçu dans l'état d'équilibre il devrait n'y avoir aucun entraînement significatif sur l'intensité et la tension pendant une période de commutation. Par conséquent, il est supposé que l'ondulation de commutation est beaucoup plus petite que le DC composantes du courant et de la tension. Cela signifie que le courant et la tension sont les mêmes au début et à la fin d'une période de commutation. C'est la petite approximation d'entraînement et il mène aux suivantes expressions de la tension de l'inducteur et le courant condensateur pendant une période de commutation  $T$  [2].

$$\begin{cases} \int_0^T V_L dt = 0 \\ \int_0^T I_c dt = 0 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Par conséquent, les expressions de la tension d'inductance et le courant du condensateur dans les deux cas de commutation sont évaluées et considéré sur une période de commutation [2].

$$I_L = V_e \frac{V_s}{R} \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{III.6})$$

$$V_s = V_e \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{III.7})$$

### III-3-2 Détermination des paramètres du hacheur Boost :

On utilise l'inductance de lissage  $L$  pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source  $V_e$  et le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur [2].

➤ **Calcul de l'inductance  $L$**

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne [2].

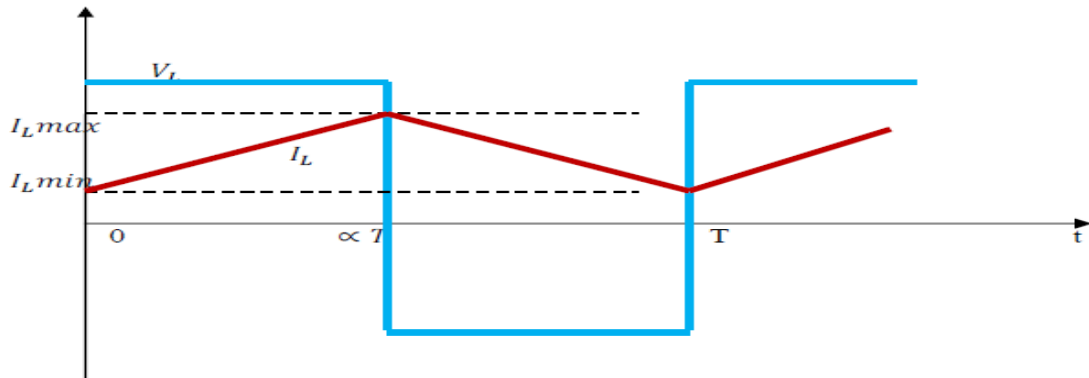


Figure III.4 : Ondulation du courant.

Calculons l'ondulation du courant :

Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$  :

$$V_L(t) = \frac{V_e}{L} + IL_{min} \quad (\text{III.8})$$

En  $t = \alpha T$  :

$$IL(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T + IL_{min} = IL_{max} \quad (\text{III.9})$$

D'où :

$$\Delta IL = IL_{max} - IL_{min} = \frac{V_e}{Lfp} \alpha \quad (\text{III.10})$$

Or :

$$V_S = \frac{V_e}{1-\alpha} \quad (\text{III.11})$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta IL = \frac{\alpha(1-\alpha)}{Lfp} V_S \quad (\text{III.12})$$



Où :

$V$  : tension aux bornes du générateur(V).

$V_s$  : Tension de sortie du convertisseur(V).

$T$  : période de découpage du signal de l'interrupteur  $T = \frac{1}{fp}$  en secondes (s).

$I_{Lmin}$  : Courant minimum dans l'inductance(A).

$I_{Lmax}$  : Courant maximum dans l'inductance(A).

$\Delta I_L$  : Ondulation de courant dans l'inductance(A).

$L$  : Valeur de l'inductance de lissage (H).

$\alpha$  : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur  $\alpha = \frac{ton}{T}$ .

L'ondulation est calculée en fonction de l'ondulation maximale de courant souhaitée. L'ondulation maximale de courant est donc donnée par :

$$\Delta I_L max = \frac{V_s}{4Lfp} \quad (\text{III.13})$$

Ainsi l'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$L = \frac{V_s}{4fp \Delta I_L max} \quad (\text{III.14})$$

#### ➤ Calcul du condensateur C

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance. L'ondulation de tension en sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur [2].

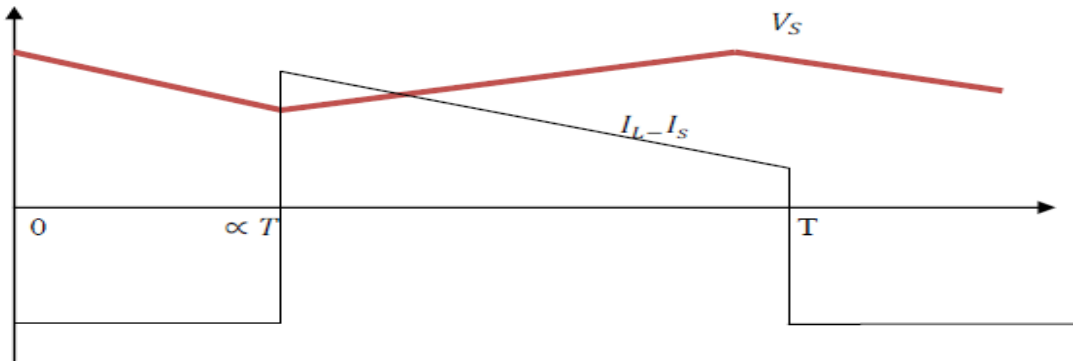


Figure III.5 : ondulation de tension.

Calculons l'ondulation de la tension :

Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$  :

$$V_s(t) = VSmax - \frac{I_s}{C}t \quad (\text{III.15})$$

En  $t = \alpha T$  :

$$V_s(\alpha T) = VSmax - \frac{I_s}{C}t = VSmax \quad (\text{III.16})$$

D'où :

$$\Delta V_s = V_{Smax} - V_{Smin} = \frac{I_e}{Cf_p} t \quad (\text{III.17})$$

Or :

$$I_s = \frac{I_s}{1-\alpha} \quad (\text{III.18})$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha(1-\alpha)}{Cf_p} \quad (\text{III.19})$$

Où :

$C$  : Valeur du condensateur de filtrage(F).

$V_{smin}$  : Tension minimum aux bornes de condensateur(V).

$V_{smax}$  : Tension maximum aux bornes de condensateur(V).

$\Delta V_s$  : Ondulation de tension aux bornes de condensateur(V).

La capacité du condensateur est calculée en fonction de l'ondulation maximale de la tension souhaitée.

L'ondulation maximale de tension est obtenue par un rapport cyclique de  $\frac{1}{2}$  (car :  $\frac{d\Delta v_s}{d\alpha} = 0$  pour  $\alpha = \frac{1}{2}$ ).

L'ondulation maximale de la tension est donnée par :

$$\Delta V_s = \frac{IL}{4Cf_p} \quad (\text{III.20})$$

Ainsi la capacité minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$C = \frac{IL}{4f_p \Delta V_{smax}} \quad (\text{III.21})$$

### III-4 Simulation du hacheur parallèle :

Nous avons utilisé logiciel Matlab pour la simulation Figure III.6 pour montrer le rôle des convertisseurs (BOOST).

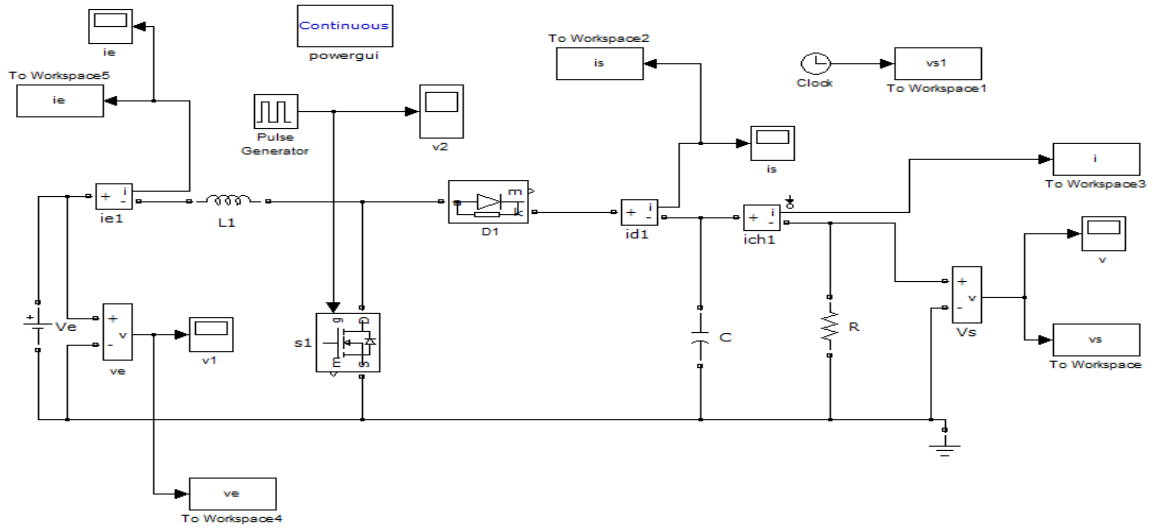


Figure III.6 : schéma bloc de simulation du convertisseur BOOST.

Le résultat de simulation du convertisseur survolteur de la figure III.7 et 8 est obtenu à l'aide du modèle mathématique sous Matlab/Simulink, Figure III.6.

En basant sur les données suivantes :

$$V_e=50v$$

$$L=0,001H$$

$$C=100.10^{-6}F$$

$$R=1000OHM$$

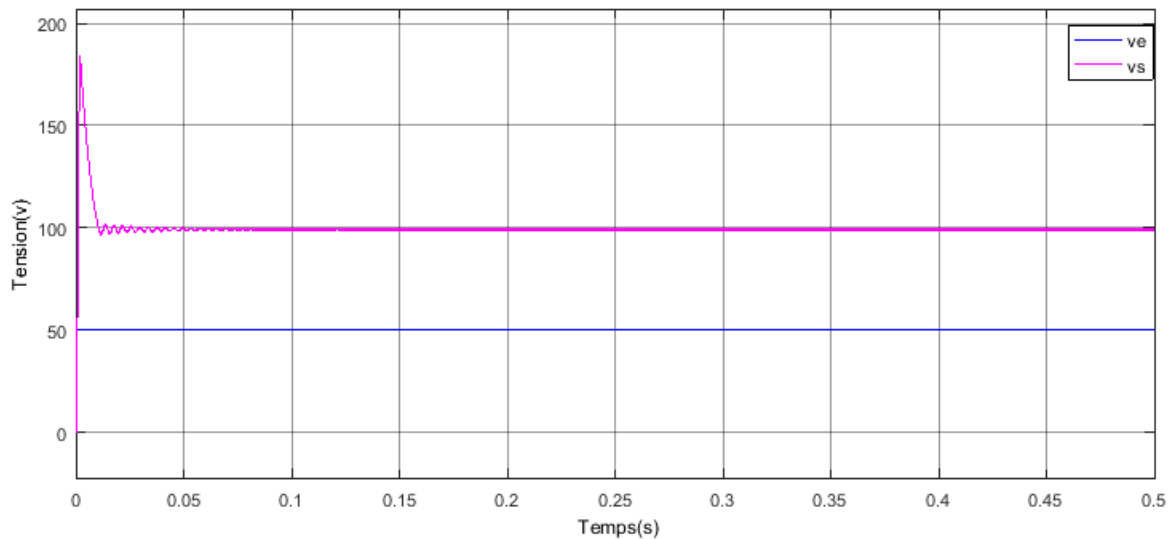


Figure III.7 : Tensions de sortie du convertisseur BOOST.

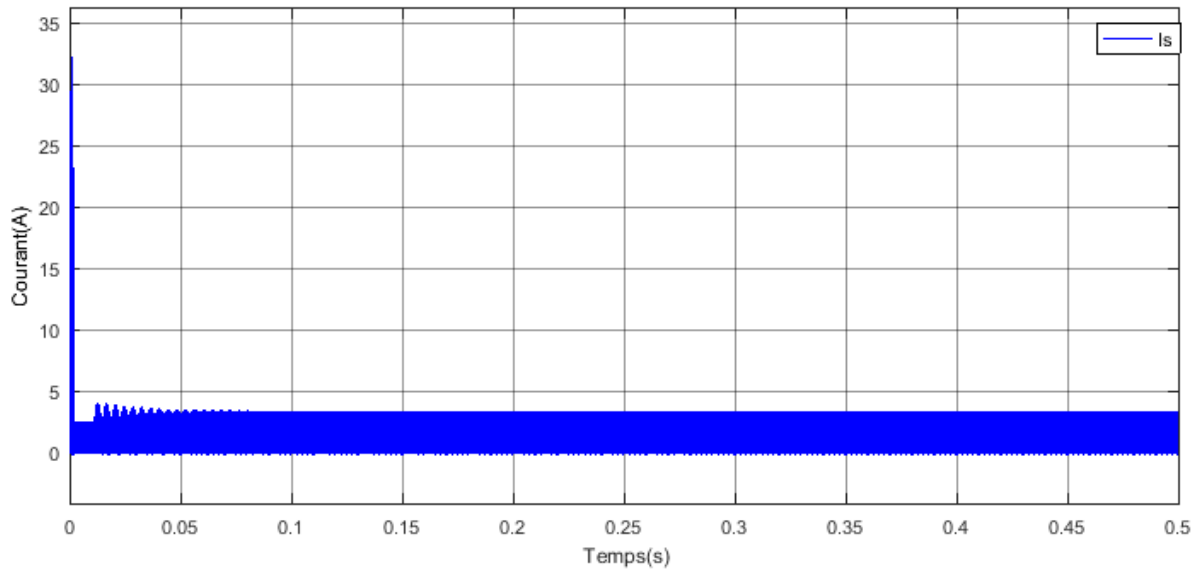


Figure III.8 : courant de sortie du convertisseur BOOST.

La simulation du convertisseur Boost nous a permis de conclure son rôle éleveur de tension, là où d'après la Figure III.7, nous remarquons que la tension de sortie est différente de celle d'entrée.

### III-5 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 représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres. Les auteurs passent en revue les différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes [21].

Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature (Recherche du Point de Puissance Maximum) ou bien (Maximum Power Point Tracking) en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [26].

### III-6 Principe de la recherche du point de puissance maximal :

#### III-6-1 Généralités :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La Figure III.9 représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur [6].

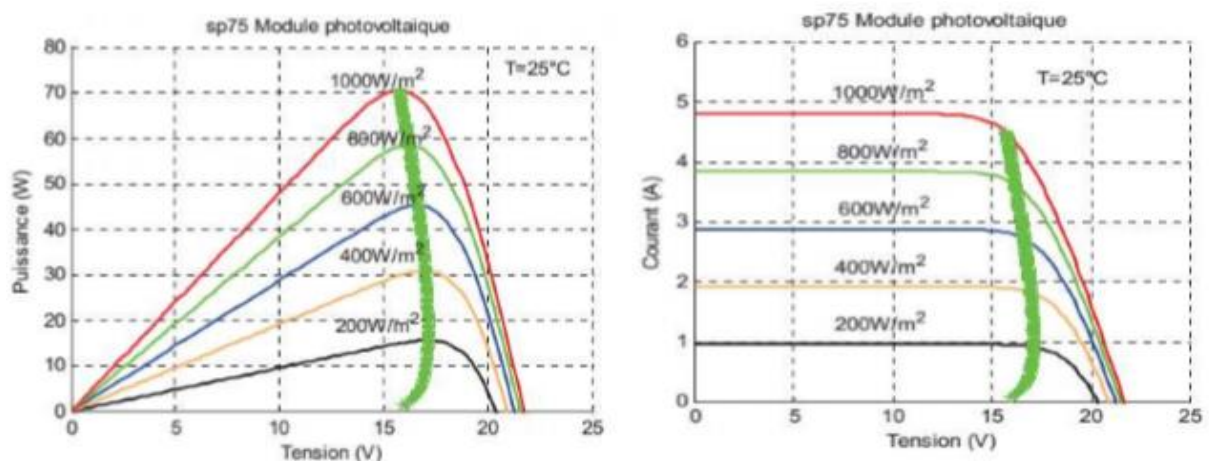


Figure III.9 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM [6].

La figure III.10 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptat Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM qui peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi tous les algorithmes performants doivent jouer sur convertisseur de puissance associé [6].

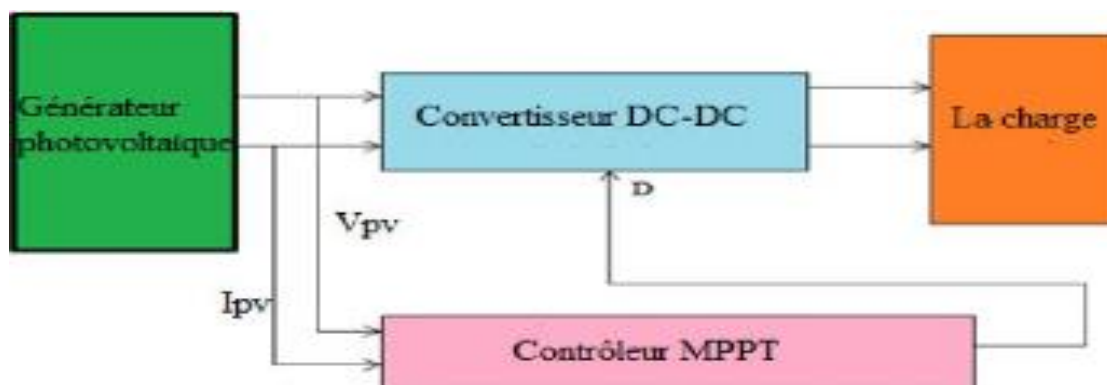


Figure III.10 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [6].

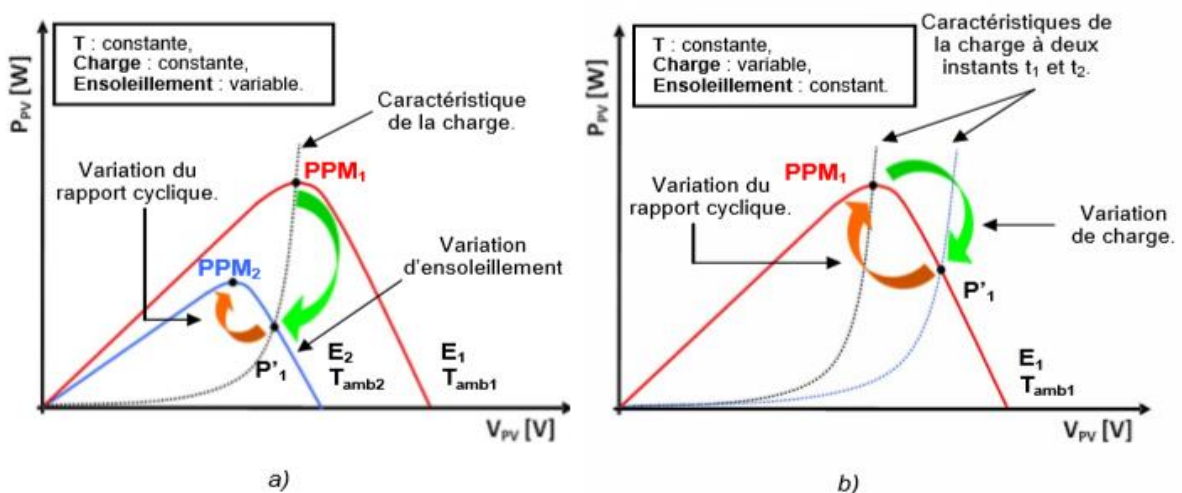
Pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont utilisés, ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques basées sur des méthodes optimales [26].

### III-7 Gestion de la MPPT :

La Figure III.11 illustre trois cas de perturbations possibles. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal noté PPM1 vers un nouveau point de fonctionnement noté P1, plus ou moins éloigné de l'optimum [27].

Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum qui correspond à PPM2. Pour une variation de charge (cas b), impliquant une nouvelle caractéristique de la charge, on peut également constater qu'une modification du point de fonctionnement est nécessaire pour rechercher une nouvelle position optimale grâce à la recherche d'un nouveau rapport cyclique. Un autre cas de variation de point de fonctionnement peut se produire, lié par exemple aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c) [27].

Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande en imposant un autre niveau de rapport cyclique, ce dernier n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents et n'implique aucune contrainte de dimensionnement de la commande. De façon générale, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher à chaque instant le PPM du GPV sans connaître a priori l'origine de la variation du point de fonctionnement [27].



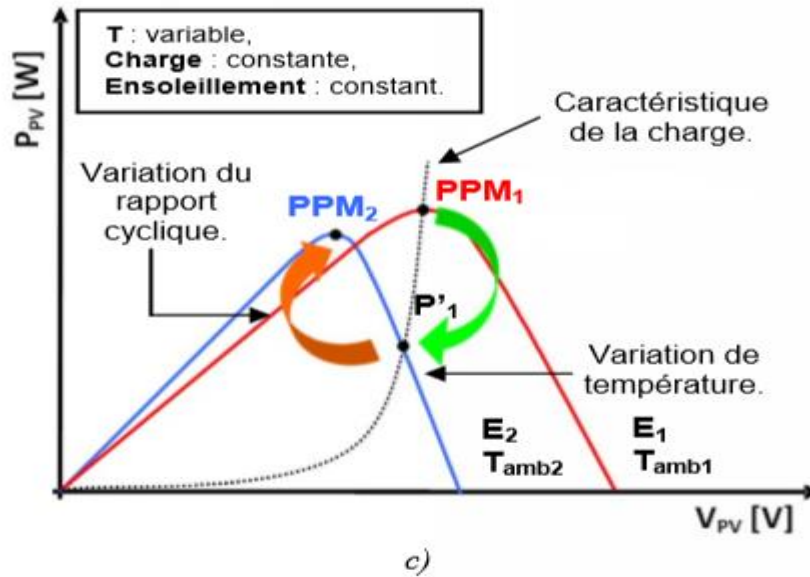


Figure III.11 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température [27].

### III-8 Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature :

Plusieurs publications sur les commandes de recherche du point de puissance maximale apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968. Ces commandes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur rapidité de recherche.

Seuls les algorithmes qui nous semblent décrire une méthode de recherche spécifique sont reportés dans ce manuscrit et brièvement analysés [24].

#### III-8-1 Les premiers types de commande MPPT :

En Janvier 1968, A.F. Boehringer a publié la première loi de commande MPPT adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. La commande, basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permet de maintenir le fonctionnement du système à son point de puissance maximale. A partir des mesures du courant délivré par le panneau photovoltaïque  $I_{ph}$  et de la tension  $V_{ph}$ , la méthode consiste à calculer la puissance à l'instant  $T_i$  et la comparer à la valeur mémorisée à l'instant  $T_{i-1}$ . Par la suite, un nouveau rapport cyclique est calculé et est appliqué au convertisseur statique [24].

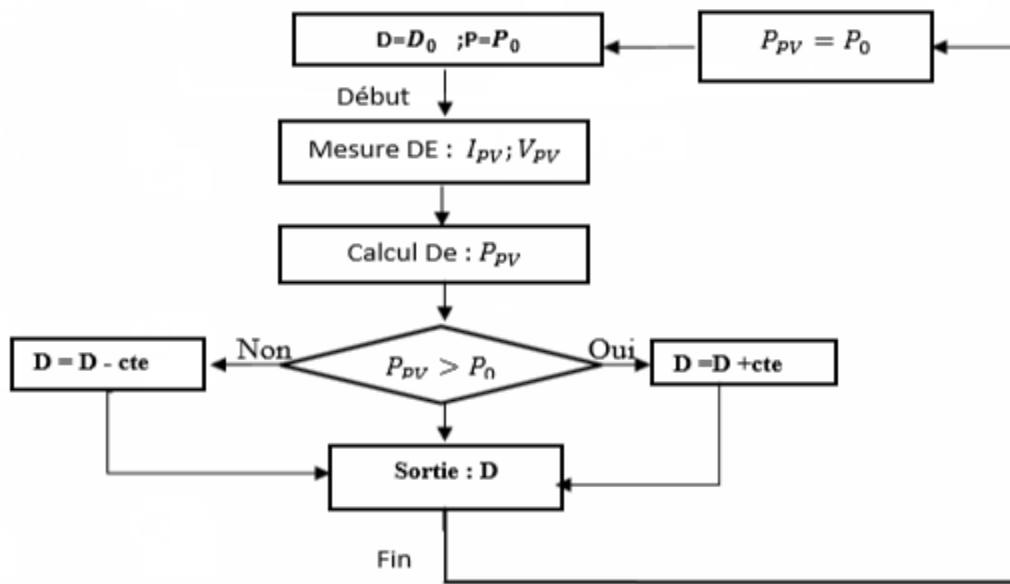


Figure III.12 : Principe de la première commande MPPT numérique.

Ce principe de commande est toujours valable, il est appliqué actuellement sur des algorithmes numériques plus performants, avec un temps de réaction et une précision de recherche PPM améliorés [24].

### III-8-2 Les commande MPPT à algorithmes performants :

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond) [2].

### III-9 Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la Figure III.13 on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM [28].

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [28].



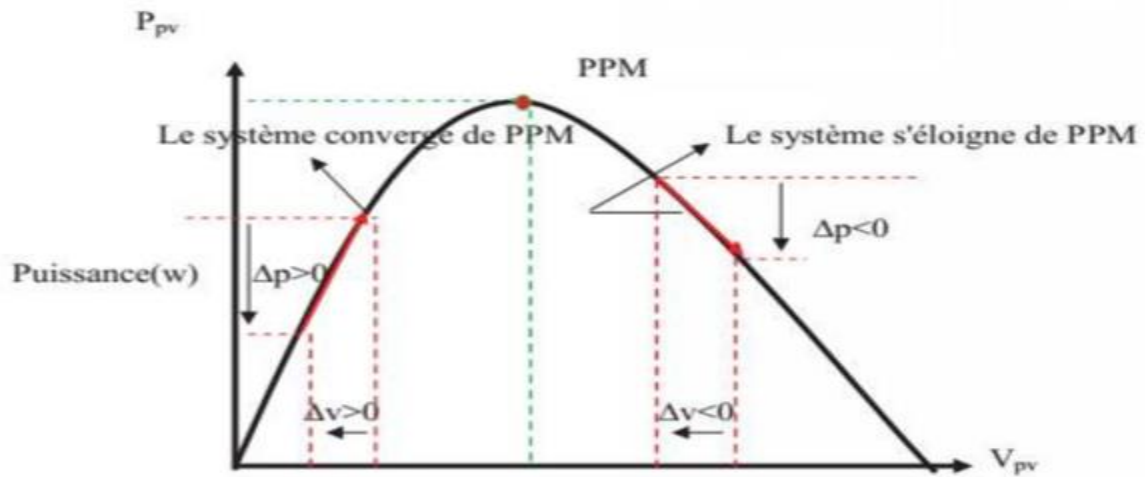


Figure III.13 : Schéma de convergence vers le PPM par P&O [28].

La figure III.14 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. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [28].

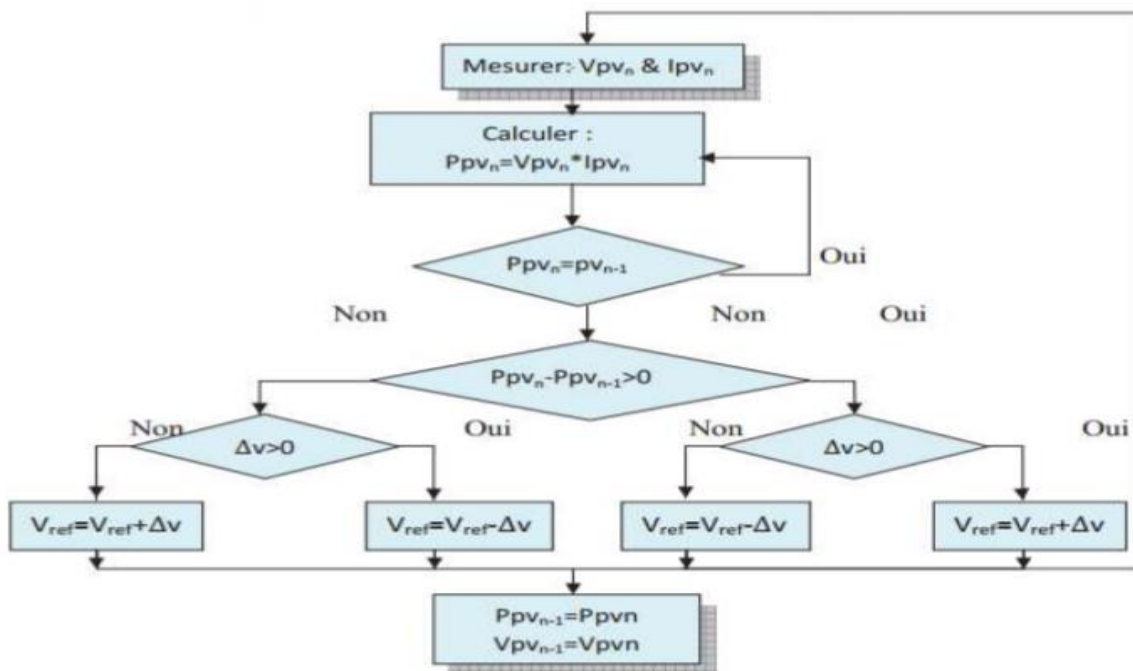


Figure III.14 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O la nouvelle puissance : Ppv\_n [28].

Avec :

Ppv\_n: la nouvelle puissance

Ppv\_{n-1}: l'ancienne puissance dans le temps (t-1)

$$\Delta v = V_{pv_n} - V_{pv_{n-1}} \tag{III.22}$$

$$\Delta P = P_{pvn} - P_{pvn-1} \quad (\text{III.23})$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée pour sa facilité d'implémentation cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [28].

### III-9-1 Le bloc de Simulation de l'algorithme perturbation et observation (P&O) :

Nous avons réalisé le modèle de simulation de l'algorithme P&O Figure III.15, en basant sur l'organigramme illustré sur la Figure III.14.

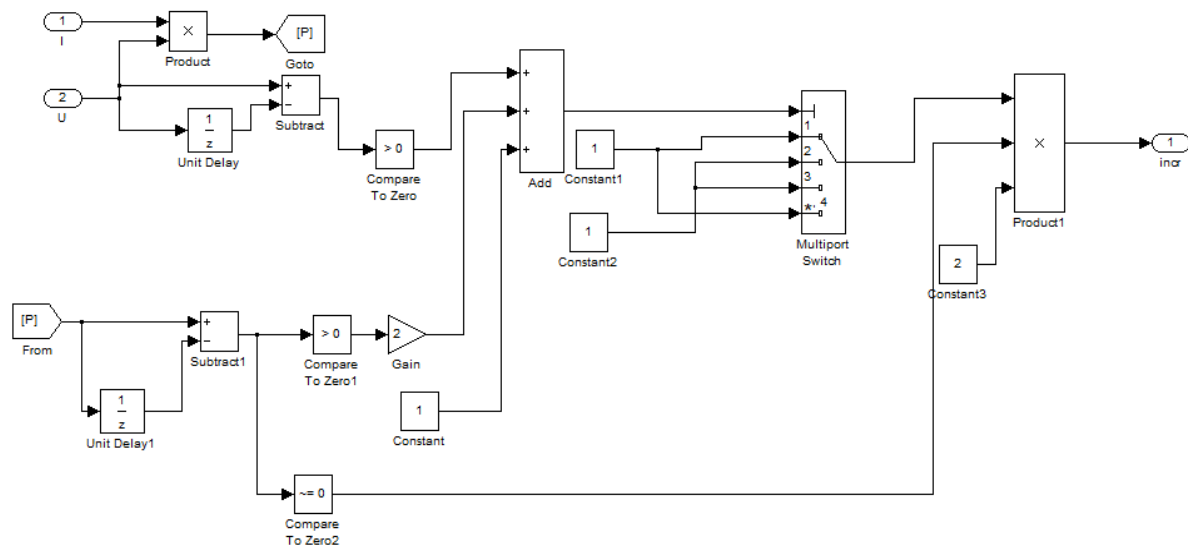


Figure III.15 : schéma bloc de simulation de l'algorithme (P&O).

### III-10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié un convertisseur DC-DC de type BOOST (élevateur). Ensuite, nous avons présenté ses caractéristiques électriques. Puis, nous avons présenté les méthodes MPPT qui utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Nous avons conclu par la simulation que la valeur de la tension de sortie peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique.

En dernier, nous avons basé sur l'étude des convertisseurs du courant continu (boost) et la commande MPPT de type P&O dans le but de les développer dans le chapitre suivante.

**CHAPITRE IV**  
**SIMULATION D'UN SYSTÈME**  
**PHOTOVOLTAÏQUE SOUS**  
**MATLAB/SIMULINK**

### IV-1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur DC/DC Boost, une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

### IV-2 Simulation d'un panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC :

• Schéma bloc :

La figure IV.1 montre le schéma bloc du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT sous MATLAB/Simulink.

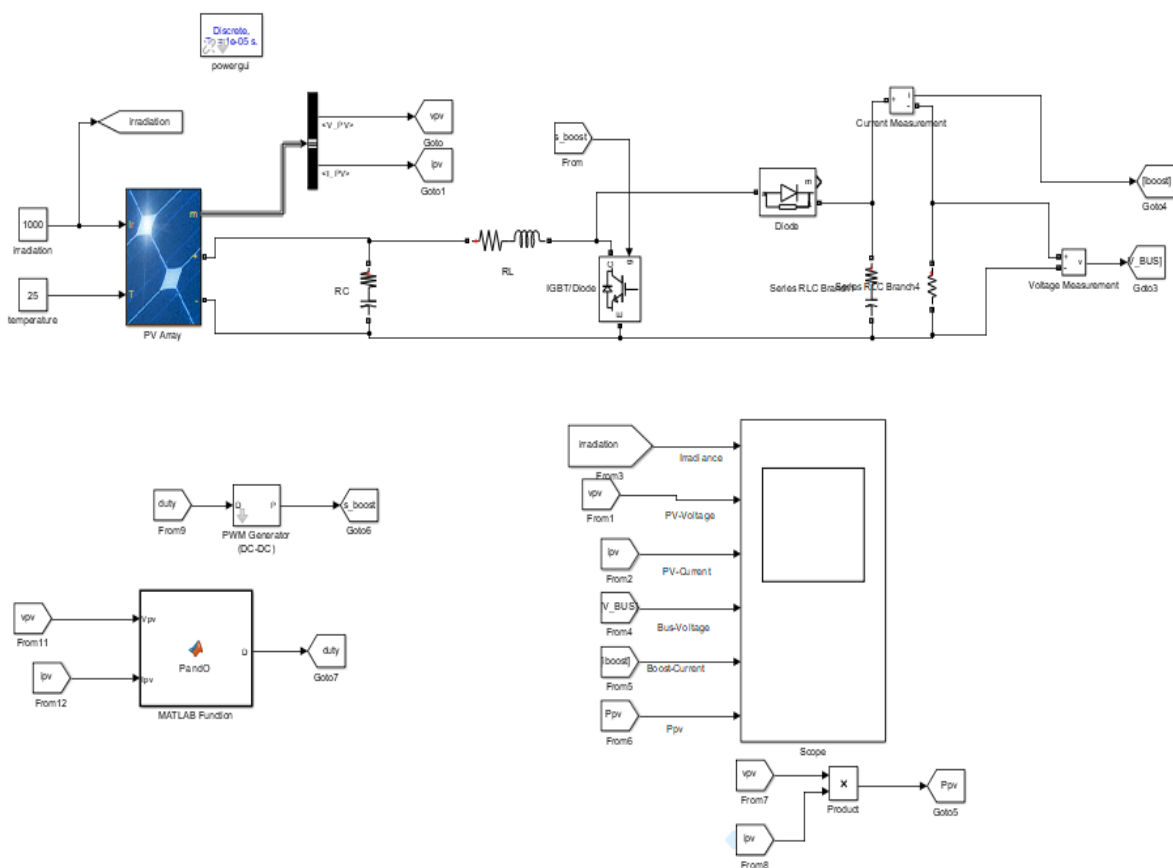


Figure IV.1 : Schéma bloc d'un panneau photovoltaïque muni de la MPPT.

### IV-2-1 Résultats de la simulation à la sortie du générateur photovoltaïque :

Les Figures IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5 représentent les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et observation ». Ces allures représentent la tension et la puissance à la sortie du générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension et la puissance à la sortie du convertisseur Boost.

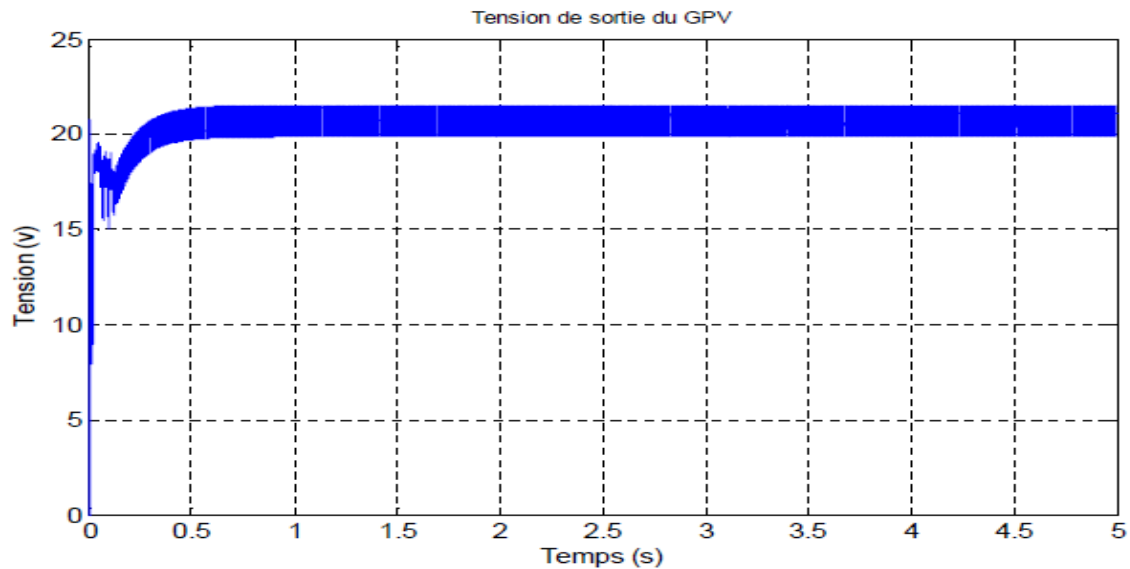


Figure IV.2 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.

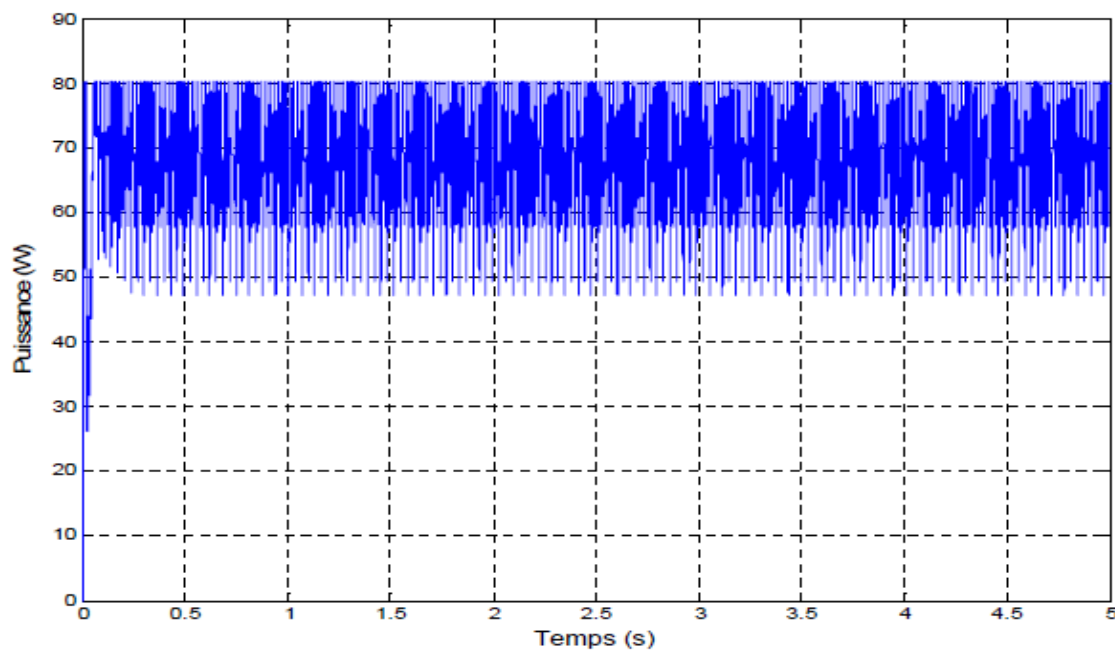


Figure IV.3 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

### IV-2-2 Résultats à la sortie du convertisseur :

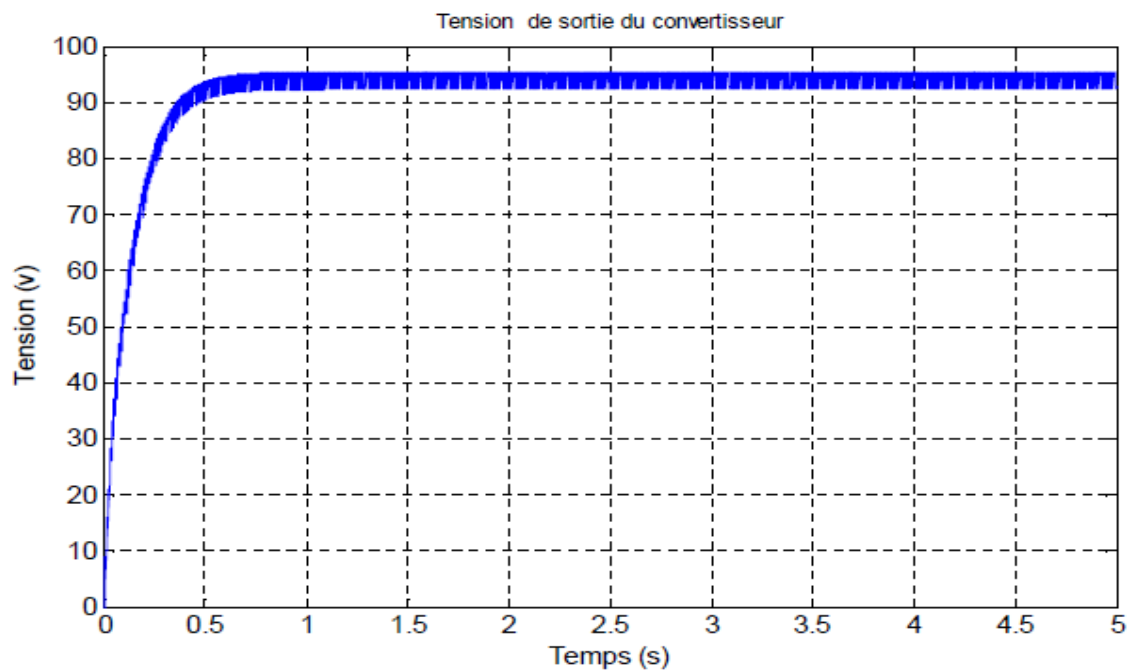


Figure IV.4 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.

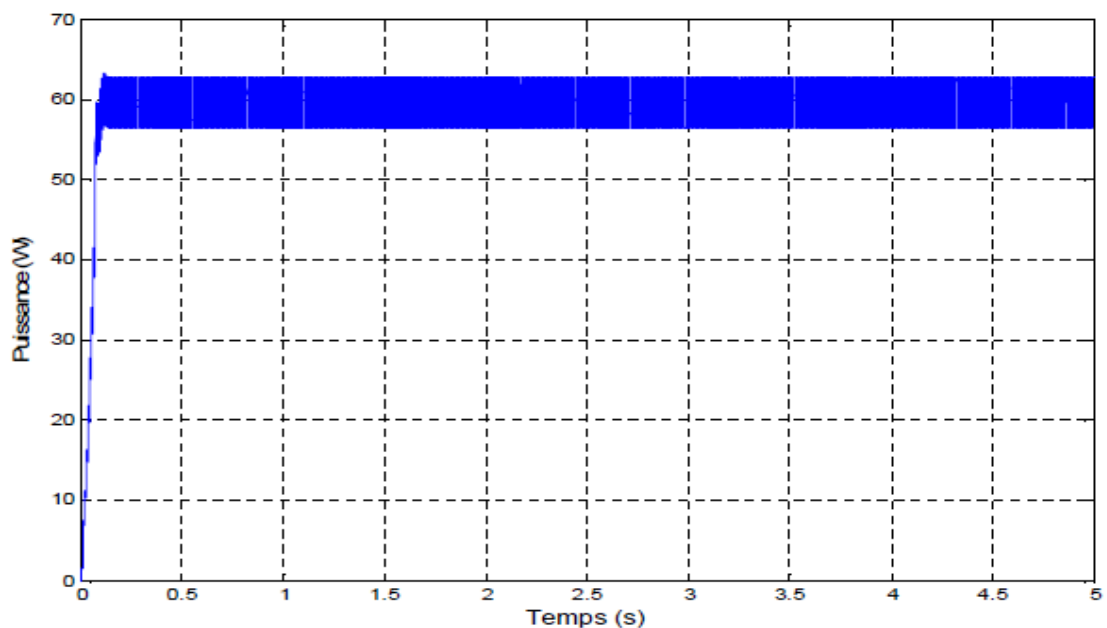


Figure IV.5 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.

### IV-2-3 Interprétation des résultats :

D'après les résultats de la simulation, nous avons remarqué que la tension à la sortie du convertisseur est environ quatre fois supérieure de celle de la sortie du panneau photovoltaïque.

De là, nous avons réalisé que le hacheur Boost a le rôle d'élévateur de tension tout en gardant la même puissance, avec une faible diminution à cause des pertes au niveau des composants et la commande utilisée.

### IV-3 Influence de l'éclairement :

Afin d'analyser la réaction du système suite à un changement brusque de l'éclairement, on procède une perturbation de  $G=1000 \text{ w/m}^2$  vers  $G=400 \text{ W/m}^2$ .

#### IV-3-1 Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque :

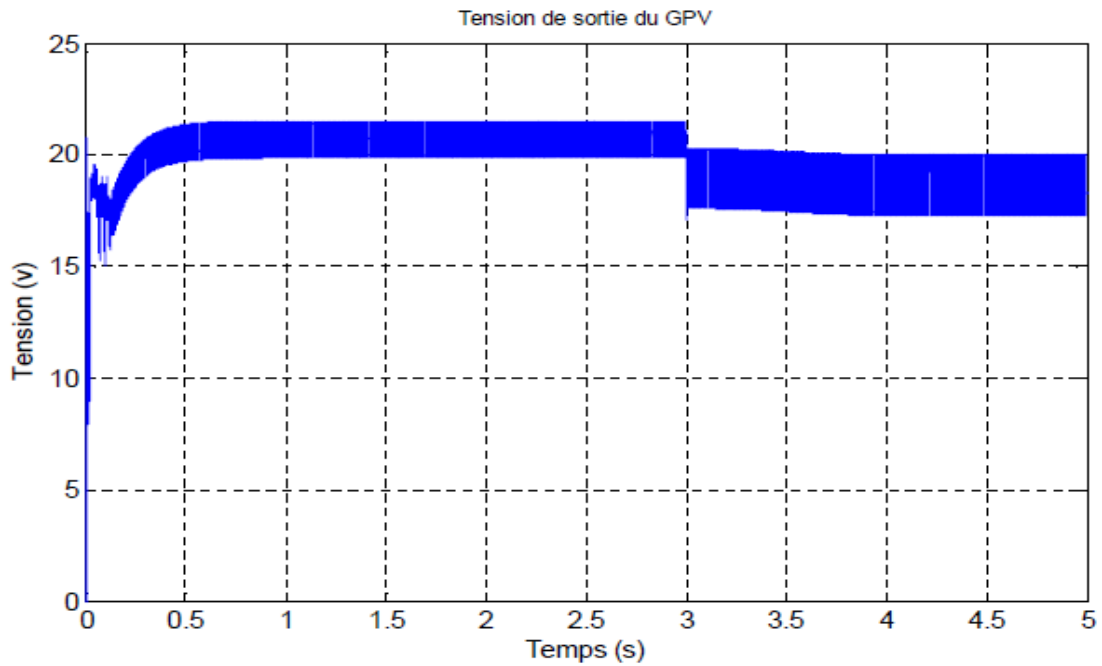


Figure IV.6 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.

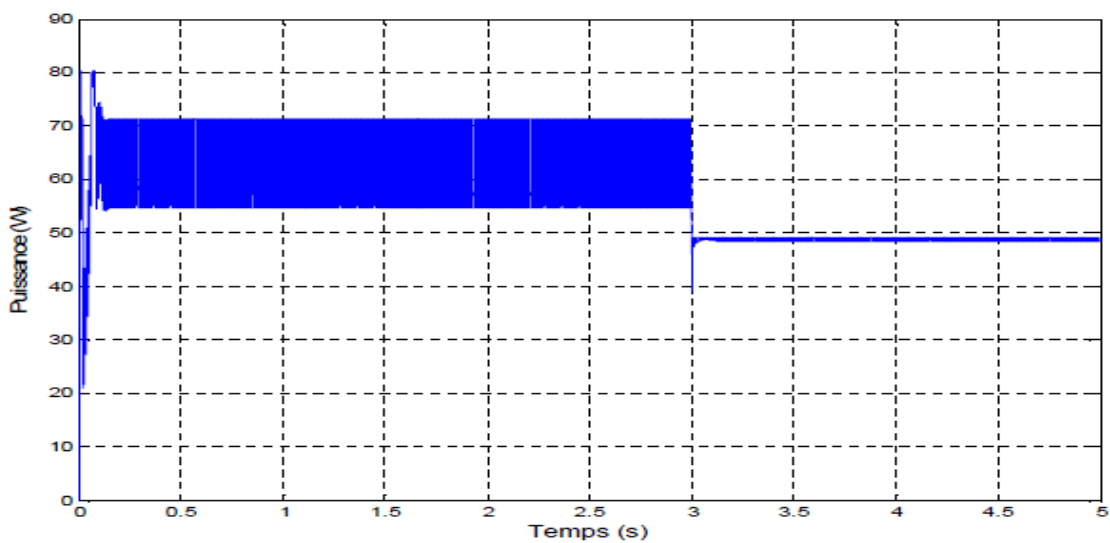


Figure IV.7 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

### IV-3-2 Résultats à la sortie du convertisseur :

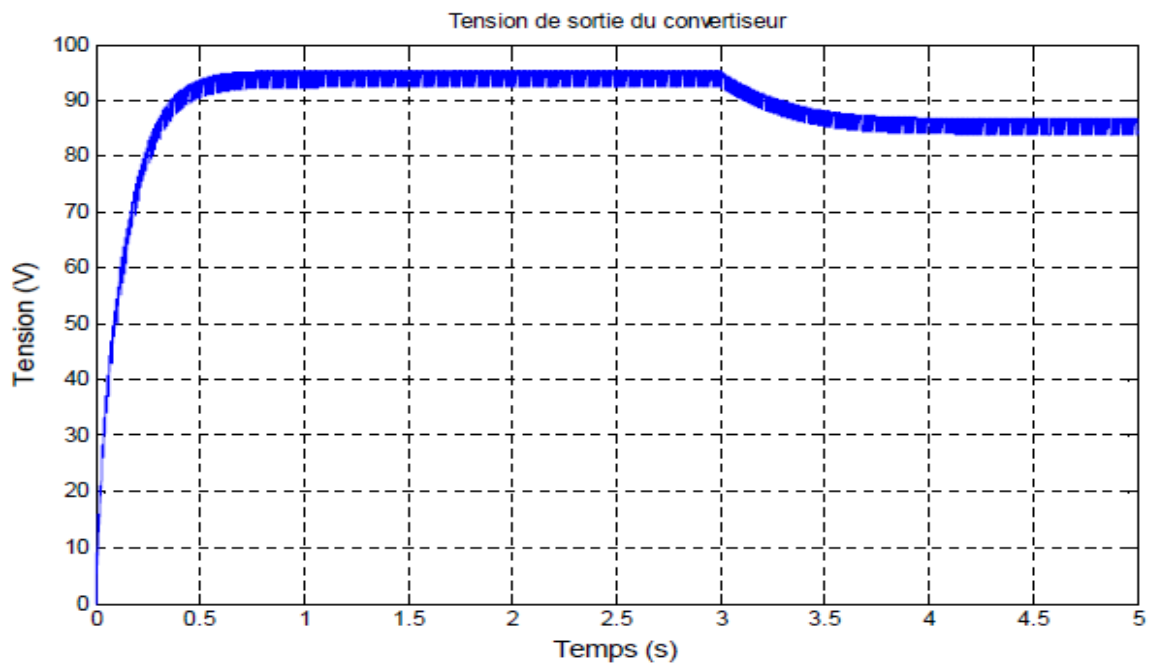


Figure IV.8 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.

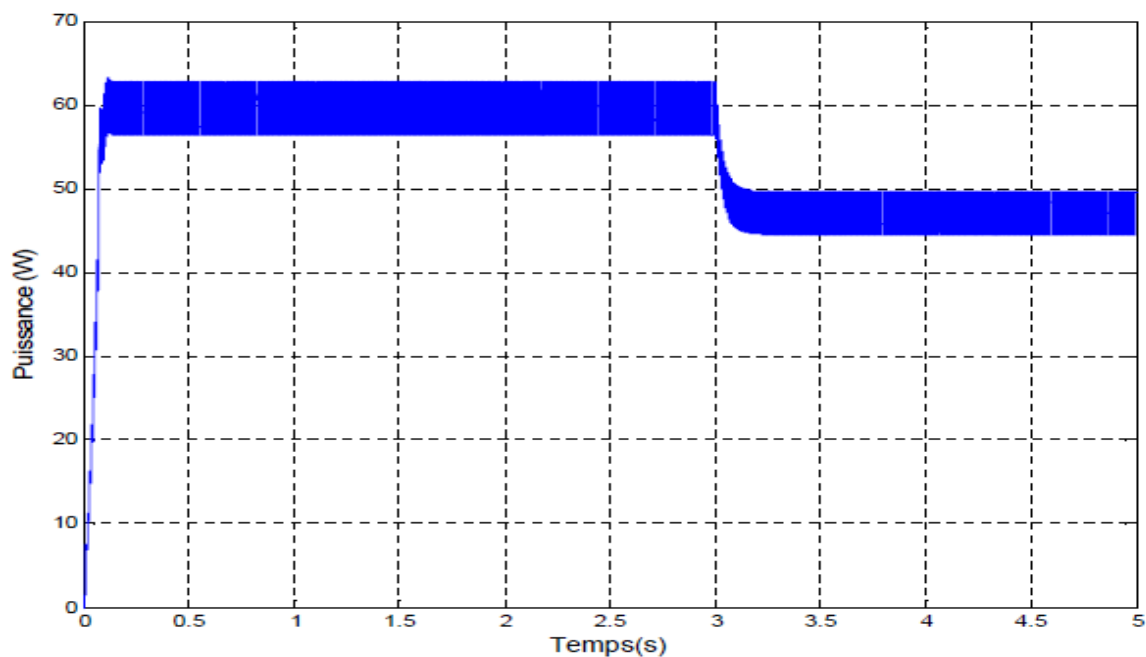


Figure IV.9 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.

### IV-3 -3 Interprétation des résultats :

Il est remarquable sur les Figures IV.6 et Figure IV.8 que la valeur de la tension à l'instant  $t=3s$  à diminué avec la diminution de l'intensité du rayonnement.



La même chose pour la puissance puisque elle dépende de la tension, avec une diminution des ondulations.

Nous avons concluons donc l'influence directe de l'éclairement.

#### IV-4 Influence de la température :

Pour voir en fonction du temps la réaction du système sur le changement brusque de la température on applique une perturbation de  $T=25C^{\circ}$  vers  $T=40C^{\circ}$  :

##### IV-4 -1 Résultats à la sortie du générateur photovoltaïque :

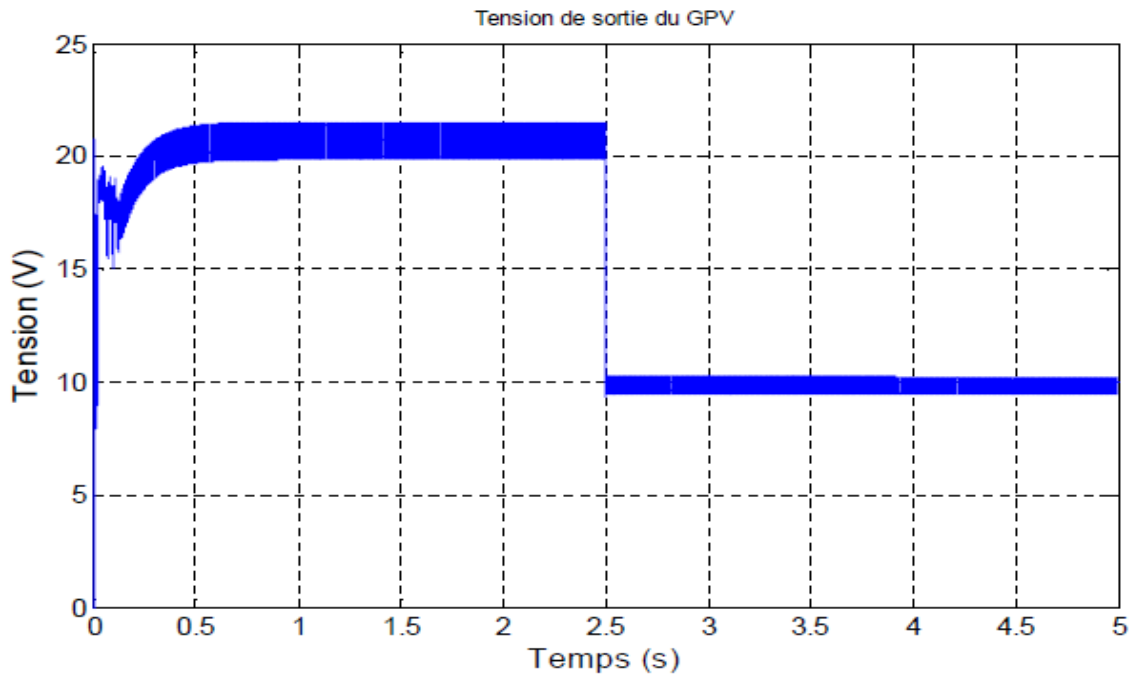


Figure IV.10 : Tension de sortie du générateur photovoltaïque.

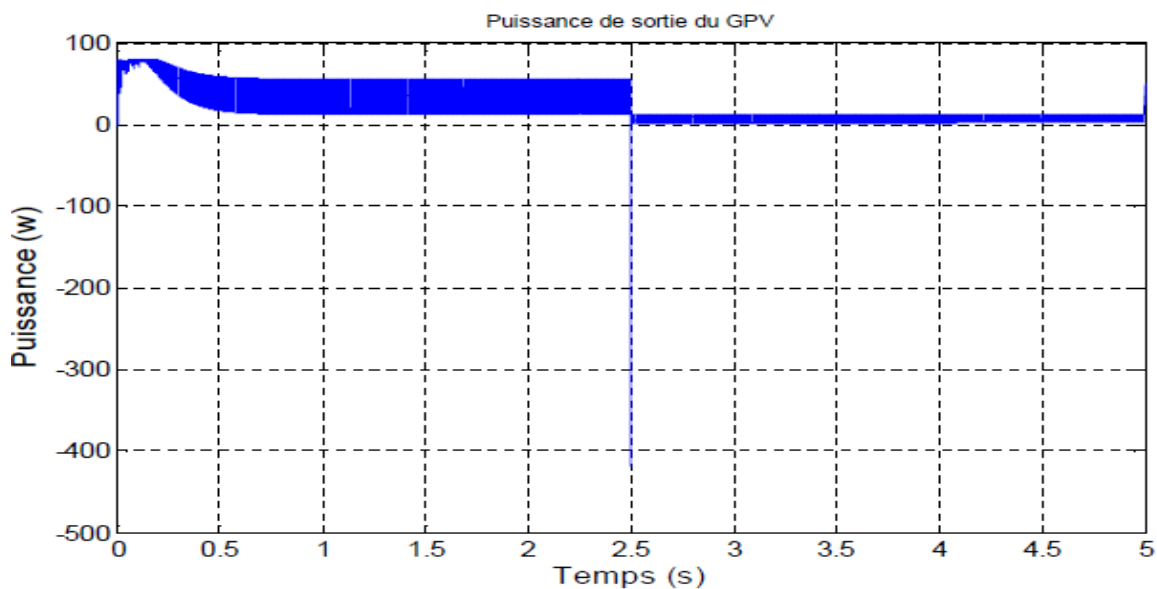


Figure IV.11 : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque.

IV-4-2 Résultats à la sortie du convertisseur :

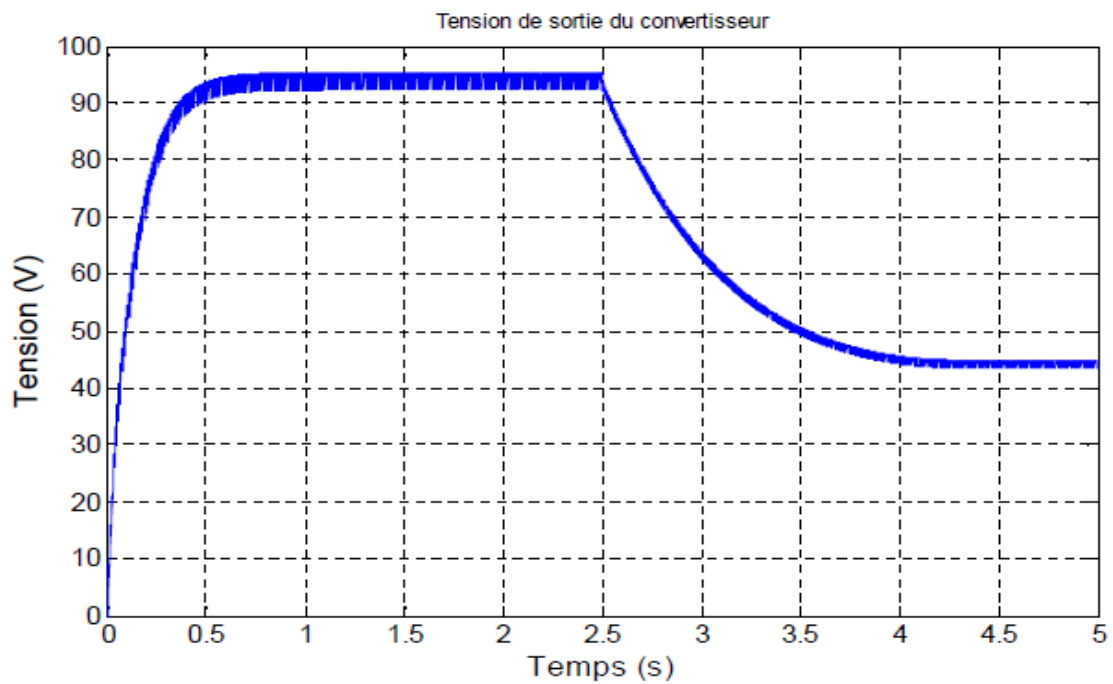


Figure IV.12 : Tension de sortie du convertisseur DC-DC.

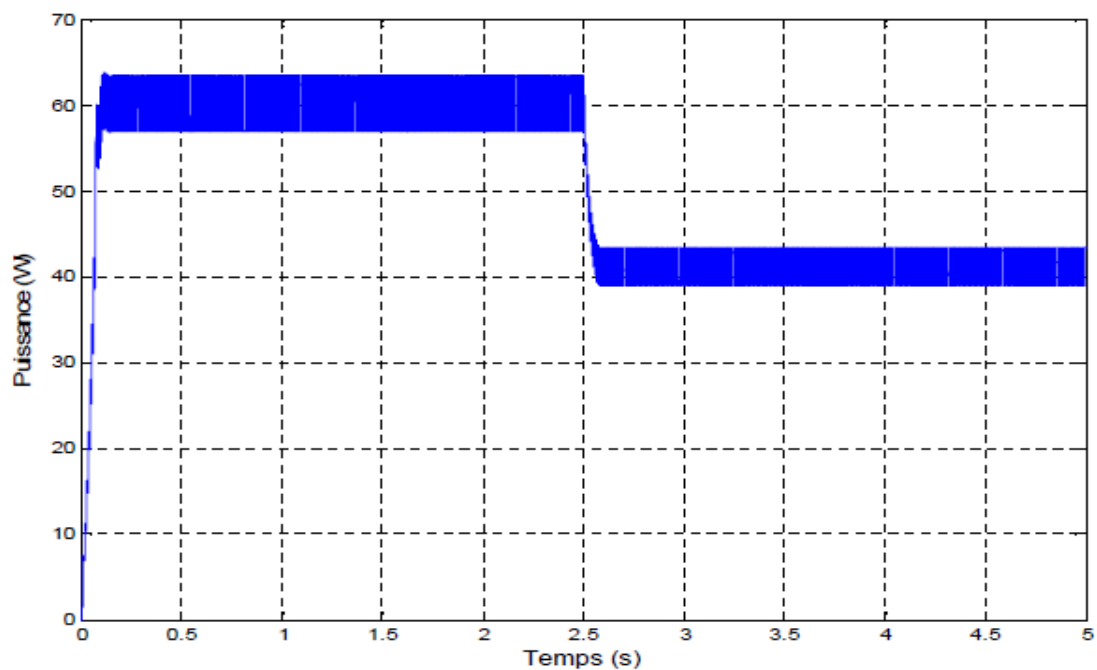


Figure IV.13 : Puissance de sortie du convertisseur DC-DC.

### IV-4-3 Interprétation :

Nous avons remarqué que la tension de sortie avant et après le convertisseur baisse assez fortement à l'instant  $t=2,5$  lorsque la température augmente Figure IV.10 et Figure IV-12. Ce qui fait lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte car la puissance diminue environ de 0.5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au décus de 25 C° Figure IV.11, IV.13.

Donc, nous remarquons l'influence directe de la température sur la tension de sortie.

Après un régime transitoire, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

### IV-5 Conclusion :

La simulation d'un système photovoltaïque a été faite par le réassemblage du panneau photovoltaïque, un convertisseur survolteur DC\DC Boost, une commande MPPT « Perturbation et observation » ainsi une charge pour évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

En dernier, nous avons réalisé que les paramètres extérieurs ont une influence sur le comportement du système photovoltaïque.

# Conclusion générale

Face à une industrialisation rapide des nations, à la modernisation de la société et à la croissance démographique continue des populations, la demande mondiale en énergie électrique ne cesse d'augmenter, alors que les sources d'énergie conventionnelles tendent à s'épuiser par effet de l'utilisation irrationnelle de l'humanité. Cette extraction incontrôlée des énergies naturelles va certainement conduire notre système écologique à l'instabilité.

Le recours systématique aux carburants fossiles, tel que le pétrole, le charbon et le gaz naturel dans la production de l'électricité a un impact désastreux sur l'environnement (la production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>) [24].

Ce mémoire concerne une étude des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque.

Le premier chapitre a été consacré pour des généralités sur le système photovoltaïque, la constitution de la cellule photovoltaïque, sa synthèse et l'effet photovoltaïque.

Le travail présenté dans le deuxième chapitre a pour but l'étude de la structure de la chaîne de conversion, le principe de fonctionnement ainsi l'influence des paramètres extérieures.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté la description générale d'un système de conversion photovoltaïque, l'étage d'adaptation et le convertisseur DC-DC (Boost) et pour terminer le principe de la recherche du point de puissance maximal.

Finalement dans le quatrième chapitre nous avons simulé le panneau photovoltaïque avec MPPT et convertisseur DC-DC pour réaliser le rôle du hacheur BOOST.

Les résultats obtenus montrent l'oscillation instantanée du point de fonctionnement du module photovoltaïque autour du PPM indépendamment à des variations de l'éclairement et la température.

## Références Bibliographiques :

- [1] A. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. » Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [2] T. Aziz et A. Rachid, « Modélisation et simulation sous MATLAB/SIMULINK d'un système Photovoltaïque adapté par une commande MPPT. » Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2014.
- [3] S. Aminata, « Simulation du système hybrides Photovoltaïque. » Thèse de Doctorat, Canada, 1998.
- [4] Paul. Mathis, « Les énergies, Comprendre les enjeux. » Edition Quae, 2011, Page.
- [5] M. Slama Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. » Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif - UFAS (ALGERIE), Mémoire de Magister, 2011.
- [6] T. Nacer Eddine et G. Slimane, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque. » Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [9] D. Mohamed, « Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïque résidentiels couplés au réseau électrique. » thèse de Doctorat, Université de Batna, 2008.
- [10] M. Mohammed, « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie. » Mémoire de magistère, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2011.
- [12] N. Hamid, « Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque et de l'onduleur. » Mémoire de Master, Université de Bouira, 2015.
- [13] H.A. Mohammed El Amine, « Etude et réalisation d'un système de production d'énergie électrique par des panneaux photovoltaïques. » Mémoire de Master, Centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019.
- [14] D. Mbaye, « Etude du fonctionnement et commande d'un système photovoltaïque raccordé au réseau. » Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2018.
- [16] T. Raouf, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque. » Mémoire de Master, Université de Jijel, 2017.
- [17] M. Angel Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. » INSA de Toulouse, 2006.
- [18] Z. Yanis, « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque. » Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaïa, 2017.

- [19] F. David, « L'énergie solaire : circonstances et conditions d'exploitation au Québec. » obtention du grade de maître en environnement, Centre Universitaire de Formation en Environnement Université de Sherbrooke, 2010.
- [20] A. Salim, « Etude d'un système photovoltaïque. » Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [21] A. Tchapo Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome. » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [22] M. Mezzai et S. Mouloudji «Contribution à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque. » Mémoire de Master, université de Bejaia, 2014.
- [23] S. Bensmail, «Contribution à la Modélisation et l'Optimisation des systèmes Photovoltaïques. »Mémoire de Magister, 2012.
- [24] B. Mhenna, « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque. » Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2018.
- [25] G. Yaakoub, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque raccordée au Réseau électrique. » Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, 2015.
- [26] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. » Thèse de doctorat, université de Toulouse III, 2008.
- [27] R. Jean-François, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques. » Thèse de Doctorat, L'université de Toulouse, 2011.
- [28] Pr. B. Kamel, « Cours énergie photovoltaïque : Chapitre 2. » Ecole Nationale Polytechnique, 2021.

## Références Webographie :

- [7] <https://opera-energie.com/energie-solaire/>, 2021.
- [8] [https://energiepluslesite.be/theories/climat8/ensoleillementd8/#Le\\_rayonnement\\_solaire](https://energiepluslesite.be/theories/climat8/ensoleillementd8/#Le_rayonnement_solaire), 2010.
- [11] <https://www.europe-energie.com/blog/petite-histoire-du-photovoltaïque/#:~:text=La%20d%C3%A9couverte%20de%20l'effet,semi%2Dconducteurs%20comme%20le%20silicium>, 2019.

[15]  
2010.

<https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaique3/modules-photovoltaiques/>.